



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de  
Caminos, Canales y Puertos.*  
**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



# **ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE OLEAJE PRODUCIDA EN DIFERENTES TIPOLOGÍAS DE ARRECIFE DE CORAL EN RECIFE (BRASIL)**

Trabajo realizado por:

***Rodrigo Campos Caba***

Dirigido:

***María Maza Fernández***

Titulación:

**Máster Universitario  
en Costas y Puertos**

Santander, septiembre de 2020

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mis sinceros agradecimientos a:

Mi tutora de Trabajo de Fin de Máster, María Maza, quien en todo momento estuvo dispuesta a apoyar y guiar para el correcto desarrollo de este estudio, lo que finalmente se traduce en la finalización de los estudios de máster.

A mis padres Reina y Vicente, y hermanos Reina y Cristóbal, quienes me han apoyado constantemente en cada uno de los desafíos que me he propuesto. Su cariño y calor familiar me acompañan a cada momento.

Carolina Padgett (Carito), mi polola, compañera y amiga, la persona que me motivó a ir en busca de esta aventura desde el primer momento. Sin duda su amor y compañía me animan a seguir cada día, a pesar de cualquier tipo de distancia que pueda existir.

Mis compañeros y a la vez familia en España: Francisco, Daniela, Cristian, Sergio y Rodrigo. Guardo como tesoro cada paseo, cena y uno que otro brindis en la sede.

Mis amigos en Chile, con quienes nunca dejé de estar en contacto y siempre lograron sacar risas para sentirme como en casa.

Finalmente, pero no menos importante, agradezco a Fundación Carolina, quienes por medio de sus programas de becas han hecho posible la realización de los estudios de Máster en Costas y Puertos en la Universidad de Cantabria. Tanto su financiamiento, como su constante preocupación por el bienestar de los becarios ha sido un gran apoyo para el cumplimiento de esta meta.

## CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN .....	14
1.1	ESTADO DEL ARTE.....	15
1.1.1	TIPOS DE ARRECIFES DE CORAL .....	15
1.1.2	PROTECCIÓN COSTERA PROPORCIONADA POR ARRECIFES DE CORAL .....	18
1.1.3	AFECCIONES SOBRE ARRECIFES DE CORAL POR CAMBIO CLIMÁTICO.....	25
1.2	OBJETIVOS .....	28
1.2.1	OBJETIVO GENERAL .....	28
1.2.2	OBJETIVOS PARCIALES.....	28
1.3	INFORMACIÓN UTILIZADA .....	28
1.4	METODOLOGÍA.....	29
2	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	31
3	DEFINICIÓN DE LOS PERFILES DE CORAL Y VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO IH2VOF .....	35
3.1	INFORMACIÓN BATIMÉTRICA Y CONDICIONES HIDRODINÁMICAS .....	35
3.1.1	DATOS DE PARTIDA .....	35
3.1.2	DOMINIO GEOMÉTRICO.....	36
3.1.3	CONDICIONES HIDRODINÁMICAS .....	37
3.1.4	CONDICIONES HIDRODINÁMICAS CON COMPONENTES DE SEGUNDO ORDEN .....	38
3.2	MALLADO NUMÉRICO .....	40
3.2.1	ARRECIFE PLATAFORMA .....	40
3.2.2	ARRECIFE FRANJA .....	40
3.3	ARCHIVOS DE SALIDA.....	41
3.4	RESULTADOS DE VALIDACIÓN .....	42
3.4.1	VALIDACIÓN ARRECIFE PLATAFORMA.....	42
3.4.2	VALIDACIÓN ARRECIFE FRANJA.....	44

3.4.3	INFLUENCIA DE GENERACIÓN DE OLAJE CON COMPONENTE DE SEGUNDO ORDEN .....	47
4	PROPAGACIÓN DE ESTADOS DE MAR.....	49
4.1	INFORMACIÓN BATIMÉTRICA DISPONIBLE .....	49
4.2	CLIMA MARÍTIMO.....	50
4.2.1	NIVEL DEL MAR .....	52
4.2.2	OLEAJE – CLIMA MEDIO .....	55
4.2.3	OLEAJE – CLIMA EXTREMO .....	59
4.2.4	VIENTO .....	61
4.3	CONSIDERACIONES NUMÉRICAS Y ESTADOS DE MAR SELECCIONADOS .....	63
4.3.1	CONSIDERACIONES NUMÉRICAS.....	63
4.3.2	ESTADOS DE MAR SELECCIONADOS .....	65
4.4	RESULTADOS DE PROPAGACIÓN .....	66
5	ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN.....	68
5.1	MALLADO .....	68
5.2	COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN ACTUAL .....	69
5.3	VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN POR EFECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO .....	72
5.3.1	AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR Y PÉRDIDA DE ÁREA CORALINA EN RECIFE.....	72
5.3.2	RESULTADOS DE COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN CON EFECTOS POR CAMBIO CLIMÁTICO	73
6	DISCUSIÓN.....	77
7	CONCLUSIONES .....	78
8	REFERENCIAS .....	80
9	ANEJOS.....	82
9.1	DESCRIPCIÓN MODELO NUMÉRICO IH2VOF .....	82
9.1.1	ECUACIONES DE GOBIERNO .....	83
9.1.2	IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA.....	85
9.1.3	CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	86

9.2	DESCRIPCIÓN MODELO NUMÉRICO IHPROPAGA.....	87
9.3	TABLAS DE INCIDENCIA DE OLAJE EN PROFUNDIDADES INDEFINIDAS.....	87
9.4	TABLA DE INCIDENCIA DE VIENTO.....	88
9.5	ESTADOS DE MAR SELECCIONADOS PARA PROPAGACIÓN IHPROPAGA.....	89
9.6	TABLAS CON RESULTADOS DE ESTADOS DE MAR PROPAGADOS.....	90
9.6.1	ARRECIFE PLATAFORMA.....	90
9.6.2	ARRECIFE FRANJA.....	90

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de formaciones coralinas.....	15
Figura 2: Perfiles de los diferentes tipos de arrecifes de coral.....	17
Figura 3: Distribución global de arrecifes de coral.....	17
Figura 4: Secciones de arrecife de coral y su atenuación de oleaje. A) Reducción de energía de ola y B) reducción de altura de ola. ....	18
Figura 5: Número de personas que se podrían favorecer por reducción de riesgos por presencia de arrecifes de coral.....	19
Figura 6: Variación de la altura significativa de ola ( $H_s$ ) a lo largo de un perfil idealizado, para coral suave y rugoso .....	20
Figura 7: Variación de altura significativa de ola ( $H_s$ ) en base a profundidad y ancho variable de arrecife, para coral suave (arriba) y rugoso (abajo). Barra de colores y líneas de contorno representan $H_s$ . El nivel del mar aumenta de izquierda a derecha, con valores de 0, 0.25, 0.50 y 1.0 [m].....	20
Figura 8: Altura de ola transmitida en arrecife de coral en diferentes escenarios.....	21
Figura 9: Perfiles tipo franja simulados y altura de ola cuadrática media total modelada. a) Experimento de Demirbilek et al. (2007); b) experimento de Buckley et al. (2015).....	22
Figura 10: a) Diagrama de dispersión entre coeficiente de transmisión ( $K_t$ ) y nivel de marea; b) altura de ola transmitida ( $H_t$ ) y superficie libre ( $F$ =elevación del arrecife-profundidad) para todos los experimentos.....	23
Figura 11: Campo de altura de ola en condiciones de tormenta durante pleamar en archipiélago de Tinharé-Boipeba.....	24

Figura 12: Evolución de línea de costa. a) Bahía de Hainan; b) bahía de Puqian. ....	25
Figura 13: Mapa combinado de misiones satelitales con los patrones regionales de nivel del mar observados (en mm/año) entre 1992-2018.....	26
Figura 14: Proyecciones regionales multimodelo del valor medio del aumento del nivel medio del mar a fin de siglo (periodo 2081-2100 con respecto a 1983-2005) para el RCP 8.5. ....	26
Figura 15: Esquema de metodología llevada a cabo.....	29
Figura 16: Cuadro de ubicación general de zona de estudio. ....	31
Figura 17: Zona costera de Recife. ....	32
Figura 18: Zona de estudio específica. A: vista en ambiente Google Earth; B: superficie batimétrica zona de estudio. Sectores de arrecifes se representan con las letras A, B, C y D. ....	33
Figura 19: Tipos de perfiles de arrecifes de coral en zona de estudio. Izquierda: mapa de distribución espacial y denominación de grupos; derecha: perfiles de arrecifes por grupo.....	34
Figura 20: Perfiles de arrecife de coral y estaciones de medición.....	36
Figura 21: Dominios numéricos considerados representados con línea roja discontinua. ....	37
Figura 22: Distribución energética de las ondas de superficie. ....	39
Figura 23: Ubicación puntos de control en perfiles de arrecifes de coral en estudio.....	41
Figura 24: Serie de superficie libre, alturas de ola y periodos de ola en estaciones inicial y de control, caso validación E1A_tormenta (arrecife plataforma).....	43
Figura 25: Evolución de parámetros de oleaje a lo largo de arrecife plataforma. Izquierda: altura significativa ( $H_s$ ); derecha: periodo significativo ( $T_s$ ). ....	43
Figura 26: Serie de superficie libre, alturas de ola y periodos de ola en estaciones inicial y de control, caso validación E2B_medio (arrecife franja).....	45
Figura 27: Serie de superficie libre, alturas de ola y periodos de ola en estaciones inicial y de control, caso validación E2B_tormenta (arrecife franja).....	45
Figura 28: Evolución de parámetros de oleaje a lo largo de arrecife franja, caso E2B_medio. Izquierda: altura significativa ( $H_s$ ); derecha: periodo significativo ( $T_s$ ). ....	46
Figura 29: Evolución de parámetros de oleaje a lo largo de arrecife franja, caso E2B_tormenta. Izquierda: altura significativa ( $H_s$ ); derecha: periodo significativo ( $T_s$ ). ....	46
Figura 30: Comparación de evolución de $H_s$ a lo largo de arrecife plataforma con diferentes métodos de generación de oleaje.....	47

Figura 31: Comparación de evolución de $H_s$ a lo largo de arrecife franja con diferentes métodos de generación de oleaje. Izquierda: caso E2B_medio; derecha: caso E2B_tormenta.....	48
Figura 32: Puntos batimétricos disponibles, Recife (Brasil). ....	49
Figura 33: Superficie batimétrica. Izquierda: vista general; derecha: vista zona de estudio. ....	50
Figura 34: Superficie batimétrica y ubicación de bases de datos de clima marítimo. ....	51
Figura 35: Series de temporales de bases de datos de oleaje ( $H_s$ y $T_p$ ), mareas y viento (velocidad). ...	52
Figura 36: Serie de marea astronómica, enero 2020. ....	52
Figura 37: Resultado análisis armónico de marea astronómica. ....	53
Figura 38: Marea astronómica semidiurna, Recife.....	54
Figura 39: Función de distribución de máximos mensuales de marea astronómica. ....	54
Figura 40: Variación de marea meteorológica de forma mensual. ....	55
Figura 41: Rosas de oleaje de altura significativa ( $H_s$ ) y periodo de pico ( $T_p$ ) en profundidades indefinidas.....	56
Figura 42: Dispersión $H_s$ y $T_p$ en profundidades indefinidas.....	57
Figura 43: Función de densidad. Izquierda: altura significativa; derecha: periodo pico. ....	57
Figura 44: Función de distribución. Izquierda: altura significativa; derecha: periodo pico. ....	58
Figura 45: Diagrama de cajas de $H_s$ y $T_p$ mensual.....	59
Figura 46: Resultados clima extremo de oleaje para $H_s$ . ....	60
Figura 47: Dispersión $H_s$ - $T_p$ y $H_s$ -Dir para oleaje sobre 2.4 [m] de altura significativa. ....	60
Figura 48: Rosa direccional de velocidad del viento. ....	61
Figura 49: Izquierda: función de densidad; derecha: función de distribución. ....	62
Figura 50: Diagrama de cajas de velocidad del viento mensual. ....	62
Figura 51: Resultados clima extremo de velocidad del viento.....	63
Figura 52: Dominios de cálculo para propagación de oleaje desde aguas profundas. Color amarillo: dominio general; color rojo: dominio de detalle.....	64
Figura 53: Combinación de variables de clima marítimo de estados de mar seleccionados. ....	65

Figura 54: Resultados comparativos entre datos de profundidades indefinidas y propagación hacia perfiles de arrecife. Izquierda: Diagrama de dispersión de $H_s$ ; derecha: rosa direccional y valores de $H_s$ (orientación de línea de costa de Recife representada con línea discontinua negra). ....	66
Figura 55: Mapas de $H_s$ para diferentes estados de mar propagados. ....	67
Figura 56: Diagrama de dispersión entre coeficiente de transmisión y marea. ....	70
Figura 57: Diagrama de dispersión entre altura de ola transmitida y calado, con ajuste por regresión lineal. ....	71
Figura 58: Perfiles de arrecife con aumento del nivel medio del mar y disminución en elevación de cresta.....	73
Figura 59: Mapa comparativo de $H_s$ entre propagación con aumento del nivel medio del mar y propagación. ....	74
Figura 60: Evolución $H_s$ caso actual y escenarios con efectos por cambio climático. ....	75
Figura 61: Diagrama de dispersión entre altura de ola transmitida y calado, con ajuste por regresión lineal (líneas punteadas negras) y bandas de confianza de 95% (línea punteada azul: arrecife franja; línea punteada roja: arrecife plataforma).....	76

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Posiciones de inicio y fin de los dominios numéricos. ....	36
Tabla 2: Condiciones iniciales de oleaje para validación, arrecife plataforma. ....	38
Tabla 3: Condiciones iniciales de oleaje para validación, arrecife franja. ....	38
Tabla 4: Resultado de caso de validación, arrecife plataforma (alturas de ola corresponden a altura significativa).....	42
Tabla 5: Resultados casos de validación, arrecife franja (alturas de ola corresponden a altura significativa).....	44
Tabla 6: Información general de bases de datos de clima marítimo.....	50
Tabla 7: Estadísticos de resumen parámetros de oleaje en profundidades indefinidas. ....	55
Tabla 8: Estadísticos de resumen de velocidad del viento. ....	61
Tabla 9: Información de dominios de cálculo, IHPropaga.....	64
Tabla 10: Coordenadas geográficas de puntos objetivos en propagación de oleaje. ....	64



Tabla 11: Características de mallas numéricas utilizadas en IH2VOF para análisis de coeficiente de transmisión. ....	69
Tabla 12: Resumen estadístico de resultados de coeficiente de transmisión ( $K_t$ ). ....	70
Tabla 13: Variación de atenuación de la altura significativa incidente, escenario con aumento del nivel medio del mar. ....	75
Tabla 14: Variación de atenuación de la altura significativa incidente, escenario con aumento del nivel medio del mar y disminución de la elevación de la cresta de arrecife. ....	75

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE OLAJE PRODUCIDA EN DIFERENTES TIPOLOGÍAS DE ARRECIFE DE CORAL EN RECIFE (BRASIL).

**AUTOR:** Rodrigo Vicente Campos Caba.

**DIRECTOR:** María Maza Fernández.

**CONVOCATORIA:** Septiembre 2020.

**PALABRAS CLAVE:** Arrecifes de coral, coeficiente de transferencia de energía, protección costera, cambio climático.

La zona costera es uno de los sistemas más dinámicos, complejos y productivos que se pueden encontrar en los ambientes naturales. Estos sectores favorecen la concentración de asentamientos urbanos, debido principalmente a la productividad industrial, pesquera, turismo y transporte. Específicamente en Brasil, aproximadamente el 20% de la población se encuentra en municipios costeros y debido a su ubicación en la región biogeográfica neotropical, su zona costera se caracteriza por poseer variados ecosistemas y ambientes naturales, como atolones, arrecifes, bancos de algas, estuarios, marismas, manglares, entre otros. Ecosistemas como arrecifes de coral tienen la capacidad de actuar como obras de protección naturales ante episodios de oleaje extremo, pero la fuerte presión urbana y el cambio climático pueden degradar estos ambientes, pudiendo provocar una disminución en el servicio de protección.

Con base en información de perfiles batimétricos, condiciones hidrodinámicas medidas en campo y bases de datos de clima marítimo en profundidades indefinidas en este trabajo se ha llevado a cabo un análisis de la transferencia de oleaje en perfiles de arrecife de coral tipo franja y plataforma, mediante el modelo IH2VOF. En primer lugar, las mediciones de campo (provenientes de Costa et al. (2015)) han sido utilizadas para validar el desempeño del modelo de detalle, obteniendo que éste logra representar el oleaje transferido a lo largo de los perfiles en estudio, tanto para condiciones medidas como de tormenta. Adicionalmente, dentro del proceso de validación se ha analizado la influencia de onda infragravitatoria mediante la generación de oleaje irregular con componentes de segundo orden, obteniendo que este tipo de ondas tiene mayor importancia en el arrecife tipo franja, lo que se debe principalmente a la rotura de oleaje en la cresta del arrecife, lo que disipa la energía de olas cortas (bajos periodos).

Posteriormente, con el objetivo de caracterizar el coeficiente de transmisión de energía en las condiciones de clima marítimo actuales, se ha realizado una descripción de condiciones medias y extremas del clima marítimo en la zona en profundidades indefinidas. Así, se han seleccionado un conjunto de estados de mar que han sido propagados frente a los perfiles de arrecife de coral. Los resultados de este proceso de propagación del oleaje son utilizados como condiciones iniciales para la realización de simulaciones con el IH2VOF, que permiten obtener la altura de ola transmitida en los arrecifes tipo franja y plataforma. De esta forma, se determinan los coeficientes de transmisión para las condiciones de clima marítimo actuales.

El análisis del coeficiente de transmisión en condiciones actuales indica que las dos tipologías consideradas tienen capacidad para atenuar la altura de ola incidente. El arrecife tipo franja presta un mayor servicio de protección, pudiendo disminuir la altura de ola hasta en un 94% en instantes de bajamar, mientras que el arrecife plataforma produce una atenuación máxima del 69% bajo las mismas condiciones. Las diferencias mencionadas se deben principalmente a que el arrecife tipo franja posee una mayor elevación en su cresta, lo que produce la rotura del oleaje en dicho punto, mientras que en el arrecife tipo plataforma la disipación de la energía se produce a medida que el oleaje recorre el perfil.

Finalmente, con el objetivo de evaluar los efectos del cambio climático en los coeficientes de transmisión en el futuro, se han incorporado efectos de aumento del nivel medio del mar y la disminución en la elevación de la cresta de los arrecifes, realizando nuevas propagaciones frente a los perfiles para una condición de oleaje de tormenta y obteniendo las variaciones del coeficiente de transmisión mediante simulaciones realizadas con el IH2VOF. Los resultados indican que, al considerar estos dos escenarios de forma conjunta, el coeficiente de transmisión de altura de ola aumenta en un 40% en el arrecife franja y en un 69% en el arrecife plataforma. Además, los valores del coeficiente de transmisión bajo estos escenarios no logran ser descritos mediante el ajuste por regresión lineal realizado para las condiciones actuales, por lo que se considera que deben ser analizados de forma independiente para lograr obtener ajustes que permitan predecir variaciones futuras con una mayor precisión.

## ABSTRACT

**TITLE:** ANALYSIS OF WAVE TRANSFER PRODUCED IN DIFFERENT TYPES OF CORAL REEF IN RECIFE (BRAZIL).

**AUTHOR:** Rodrigo Vicente Campos Caba.

**DIRECTOR:** María Maza Fernández.

**SUBMISSION DATE:** September 2020.

**KEY WORDS:** Coral reefs, energy transfer coefficient, coastal protection, climate change.

The coastal zone is one of the most dynamic, complex and productive systems that can be found in natural environments. These sectors favor the concentration of urban settlements, mainly due to industrial, fishing, tourism and transportation productivity. Specifically in Brazil, approximately 20% of the population is found in coastal municipalities and due to its location in the neotropical biogeographic region, its coastal zone is characterized by having varied ecosystems and natural environments, such as atolls, reefs, algae banks, estuaries, marshes, mangroves, among others. Ecosystems such as coral reefs have the ability to act as natural protection in the event of extreme waves, but strong urban pressure and climate change can degrade these environments, potentially causing a decrease in the protection service.

Based on information from bathymetric profiles, hydrodynamic conditions measured in the field and maritime climate databases at depths waters, in this work an analysis of wave transfer has been carried out in fringing and platform coral reef profiles, using the IH2VOF model. In the first place, field measurements (from Costa et al. (2015)) have been used to validate the performance of the detail model, obtaining that it manages to represent the waves transferred along the profiles under study, both for mean and storm conditions. Additionally, within the validation process the influence of infragravitational wave has been analyzed through the generation of irregular waves with second-order components, obtaining that this type of waves is of greater importance in the fringing reef, which is mainly due to breaking wave process on the crest of the reef, dissipating the energy of short waves (low periods).

Subsequently, in order to characterize the energy transmission coefficient in the current maritime climate conditions, a description of mean and extreme conditions of the maritime climate in the area at depth water has been made. Thus, a set of sea states have been selected that have been propagated in front of the coral reef profiles. The results of this wave propagation process are used as initial conditions to carry out simulations with the IH2VOF, that allow obtaining the wave height transmitted in the fringing and platform reefs. In this way, the transmission coefficients for the current maritime climate conditions are determined.

The analysis of the transmission coefficient under current conditions indicates that the two typologies considered have the capacity to attenuate the height of the incident wave. The fringing reef provides a greater protection service, being able to decrease the wave height by up to 94% at times of low tide, while the platform reef produces a maximum attenuation of 69% under the same conditions. The differences mentioned are mainly due to the fact that the fringing reef has a higher elevation at its crest, which causes the break of the waves at that point, while in the platform reef the dissipation of energy occurs as the waves propagates across the profile.

Finally, with the aim of evaluating the effects of climate change on transmission coefficients in the future, effects of an increase in mean sea level and a decrease in the elevation of the crest of the reefs have been incorporated, making new propagations for a storm condition and obtaining the variations of the transmission coefficient through simulations carried out with the IH2VOF. The results indicate that, when considering these two scenarios together, the wave height transmission coefficient increases by 40% in the fringing reef and by 69% in the platform reef. Furthermore, the values of the transmission coefficient under these scenarios cannot be described by the linear regression adjustment carried out for the current conditions, so it is considered that they must be analyzed independently to obtain adjustments that allow predicting future variations with a greater precision.

# 1 INTRODUCCIÓN

La presencia de ecosistemas como arrecifes de coral permiten disipar gran parte de la energía incidente de las olas, pudiendo alcanzar una atenuación de 97% de la energía del oleaje (Ferrario et al., 2014). Debido a esto, varios estudios han demostrado que la disminución del área de arrecifes de coral afectaría la capacidad de estos ecosistemas para mantener una línea de costa estable, resultando en una erosión significativa de la línea de costa (e.g.: Zhao et al., 2019; Elliff et al., 2019).

En Brasil, los arrecifes de coral han demostrado una alta eficiencia en la atenuación de la altura de ola, incluso en condiciones de alta energía durante bajamar (Elliff et al., 2019). En Recife, al noreste de Brasil, mediciones de campo de la altura de ola transmitida una vez que esta se ha propagado por el arrecife, indican que, en condiciones de bajamar, en arrecifes tipo plataforma aproximadamente el 67% de la altura de ola incidente es disipada, mientras que el porcentaje asciende hasta un 99.9% en arrecifes tipo franja (Costa et al., 2015).

Sin embargo, efectos por cambio climático pueden degradar estos ecosistemas. El aumento de la temperatura superficial del mar produce un aumento en la acidificación del ambiente marino, dando paso al proceso de blanqueamiento del coral, para finalmente perder su cobertura sobre los arrecifes (Losada et al., 2020). El estudio realizado por Sheppard et al. (2005) en el archipiélago de Seychelles, indica que la protección de la línea de costa por parte de arrecifes de coral se puede ver afectada por dos motivos: aumento de la mortalidad de coral y el aumento progresivo del nivel del mar, ambos efectos del cambio climático. Estas dos variables, actuando de forma individual o en conjunto, resultan en un aumento de calado sobre la cresta de los arrecifes, reduciendo el servicio de protección de la línea de costa (Costa et al., 2015).

Con el objetivo de comprobar los antecedentes antes mencionados y poder alcanzar un mejor entendimiento de la capacidad de protección de este tipo de ecosistemas, el presente estudio se centra en analizar la transformación de la altura de ola incidente en arrecifes de coral tipo plataforma y franja, en Recife (Brasil). Para esto, se utiliza el modelo IH2VOF, modelo CFD (Computational Fluid Dynamics) que resuelve las ecuaciones RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). El proceso de validación de los resultados del modelo numérico se lleva a cabo utilizando la información de mediciones de campo disponibles en Costa et al. (2015).

Posteriormente, se propagan diferentes estados de mar de interés frente a los perfiles en estudio utilizando el modelo IHPropaga, permitiendo así, realizar un análisis del coeficiente de transmisión de altura de ola para los estados de mar seleccionados. Finalmente, con el objetivo de analizar posibles efectos del cambio climático en la protección proporcionada por los diferentes arrecifes, se realizan nuevas simulaciones con el IH2VOF, considerando dos de los efectos por cambio climático más relevantes en arrecifes de coral: el aumento del nivel del mar y la disminución del área de coral.

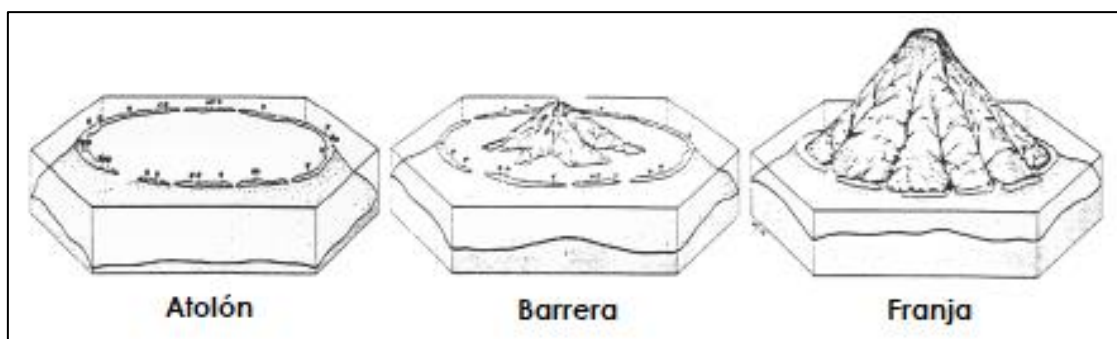
## 1.1 ESTADO DEL ARTE

En esta sección se expone la revisión bibliográfica llevada a cabo para el presente estudio. Dentro de los tópicos se considera la descripción de los arrecifes de coral, abarcando su formación, tipos y distribución global. Junto con esto, se presentan antecedentes en los cuales diversos autores han analizado el rol de los arrecifes de coral en la atenuación de la altura de ola incidente y los cambios que se podrían apreciar por efectos de cambio climático, tanto en el aumento del nivel medio del mar, como también los efectos adversos sobre los corales.

### 1.1.1 TIPOS DE ARRECIFES DE CORAL

Los ecosistemas de coral, especialmente los arrecifes, representan una expresión avanzada en la evolución ecosistémica marina, cuya formación es el resultado de la transformación del medio marino por la presencia de algas y corales (Márquez, 1996). Gran parte de las formaciones coralinas corresponden a organismos coloniales, lo que implica que están compuestas por miles de especies animales, llamados pólipos. Estas especies nadan libremente hasta llegar a sectores rocosos sumergidos u otras superficies duras a lo largo de islas o continentes, a los cuales se adhieren, dando paso a la formación de arrecifes de coral<sup>1</sup>.

El sistema que forman los corales acumula nutrientes y estructuras de carbonato de calcio de sus esqueletos, proceso que realizan a lo largo de siglos, llegando al punto de cambiar la topografía marina (Márquez, 1996). A medida que los corales crecen y se expanden, los arrecifes adquieren diferentes estructuras, dentro de las cuales se encuentran los tipos franjas, barreras o atolones (Figura 1).



**Figura 1: Tipos de formaciones coralinas (Modificado de Yamano et al., 2005).**

<sup>1</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service. Disponible en: [\[https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial\\_corals/coral01\\_intro.html\]](https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_corals/coral01_intro.html).

Los tipos de formaciones coralinas mencionadas se describen a continuación<sup>2</sup> (Darwin, 1842):

- Franja (fringing): corresponden al tipo de arrecife más común. Crecen cerca de la línea de costa, alrededor de islas y continentes. Se encuentran separados de la orilla de la costa por lagunas estrechas y poco profundas.
- Barrera (barrier): al igual que el tipo franja, los arrecifes barrera crecen paralelos a la costa, pero las lagunas que las separan de la orilla son anchas y de mayor profundidad. En su punto más alto pueden disminuir considerablemente la profundidad de la columna de agua, pudiendo incluso alcanzar la superficie, lo cual representa un condicionante para la navegación en sus alrededores.
- Atolones (atoll): son anillos de coral que generan lagunas protegidas, ubicadas generalmente en medio del mar. Los atolones se forman generalmente cuando las islas rodeadas de arrecifes se hunden en el mar o cuando el nivel del mar sube de forma significativa a su alrededor. Los arrecifes que bordean continúan creciendo y eventualmente forman círculos con lagunas en su interior.

Un cuarto tipo corresponde a arrecifes plataforma (platform), los cuales son pequeños arrecifes aislados que crecen desde el fondo abierto de la plataforma de la isla o desde la plataforma continental. Este tipo de arrecife puede (o no) estar detrás de un arrecife barrera, con posibilidad de sufrir elongación si se establece en un banco de arena<sup>3</sup>. Los arrecifes tipo plataforma varían mucho en su tamaño y rara vez alcanzan la superficie del agua. En la Figura 2 se exponen vistas en perfil de cada uno de los tipos de arrecifes descritos, en la cual es posible apreciar que estos están compuestos por una cresta y una sección plana, esta última especialmente en arrecife tipo franja. Se entiende como sección plana a la parte poco profunda del arrecife que se extiende desde la orilla hacia aguas profundas, la cual usualmente se caracteriza por una reducción de la circulación de agua y la consiguiente acumulación de sedimentos. Por otra parte, la cresta de arrecife se corresponde con el borde hacia el mar y, a menudo, la parte menos profunda, punto donde se produce la rotura del oleaje (Ferrario et al., 2014).

Las formaciones coralinas pueden presentar variaciones respecto a las áreas que cubren. Éstas pueden ir desde coberturas discontinuas, hasta grandes sectores arrecifales formadores de islas. Su formación requiere de condiciones que se encuentran específicamente en mares tropicales, con temperaturas sobre los 20°C, salinidad marina promedio estable, sectores principalmente rocosos (poco sedimento), alta luminosidad y aguas oligotróficas (Márquez, 1996). En la Figura 3 se muestra la distribución global de arrecifes de coral, en la cual se aprecia que estos se encuentran ubicados principalmente en el sector tropical, con una alta presencia en la zona Este del océano Pacífico.

<sup>2</sup> Coral Reef Alliance. Disponible en: [<https://coral.org/coral-reefs-101/coral-reef-ecology/types-of-coral-reef-formations/>].

<sup>3</sup> Britannica. Disponible en: [<https://www.britannica.com/science/platform-reef>].



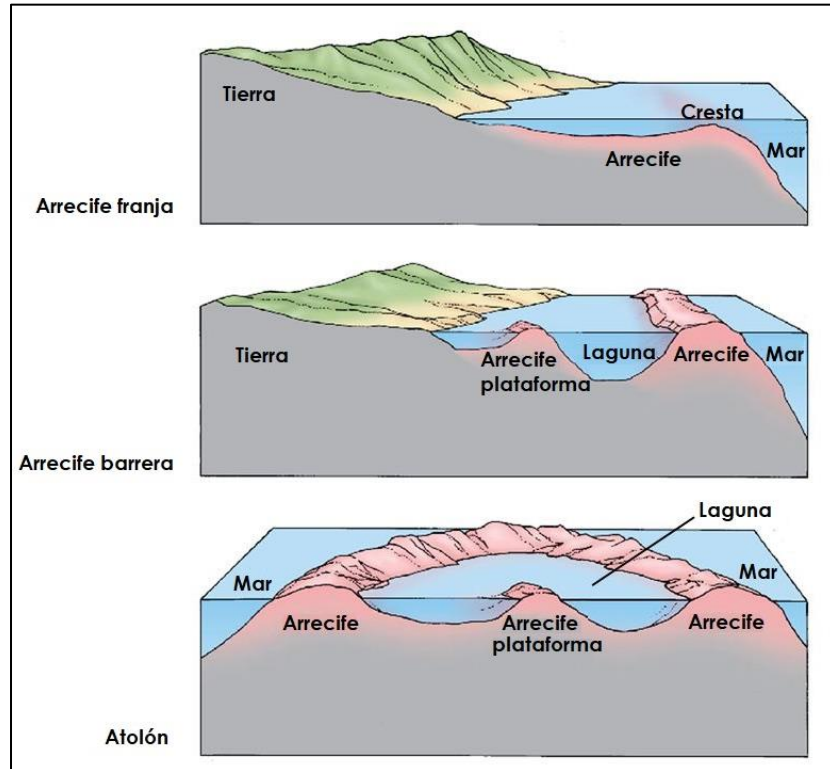


Figura 2: Perfiles de los diferentes tipos de arrecifes de coral.

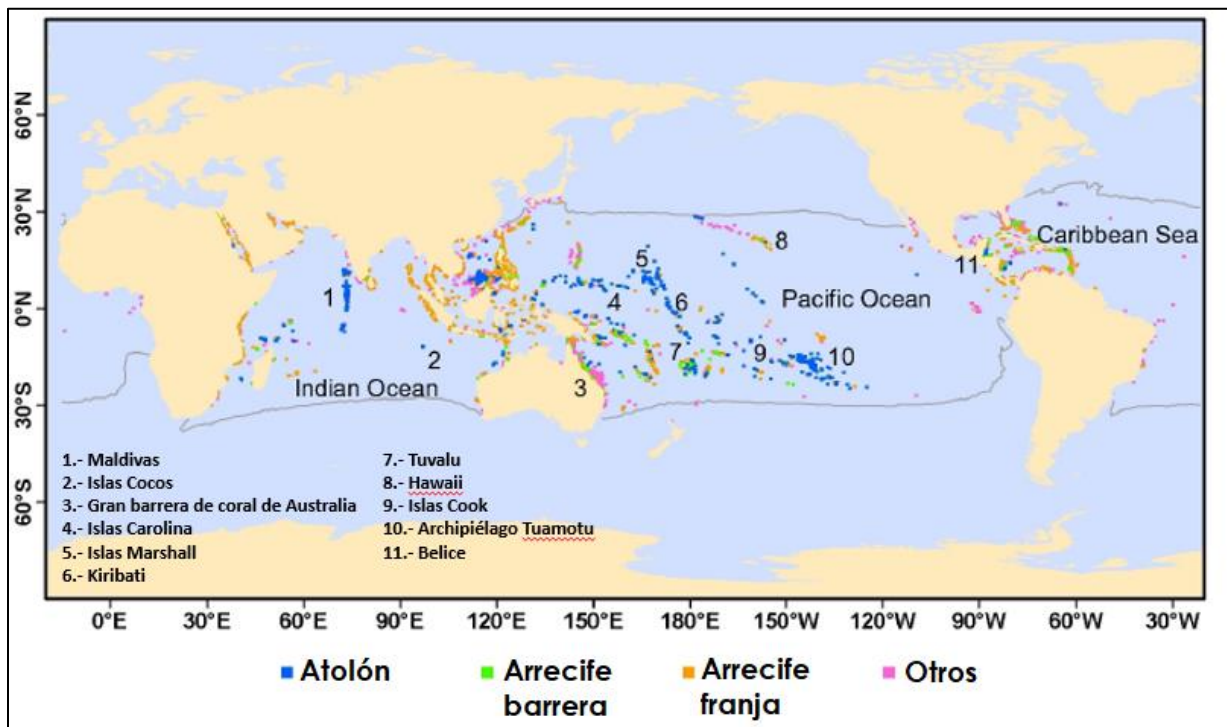
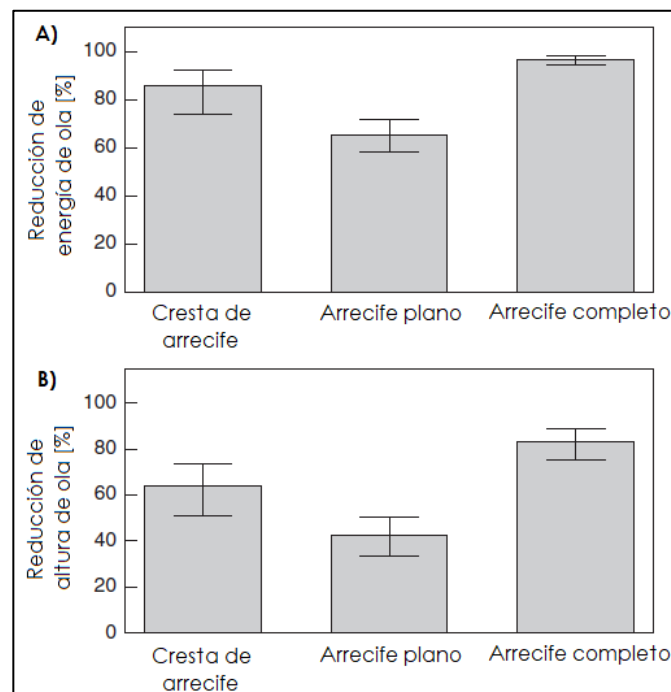


Figura 3: Distribución global de arrecifes de coral (Modificado de Yamano et al., 2005).

### 1.1.2 PROTECCIÓN COSTERA PROPORCIONADA POR ARRECIFES DE CORAL

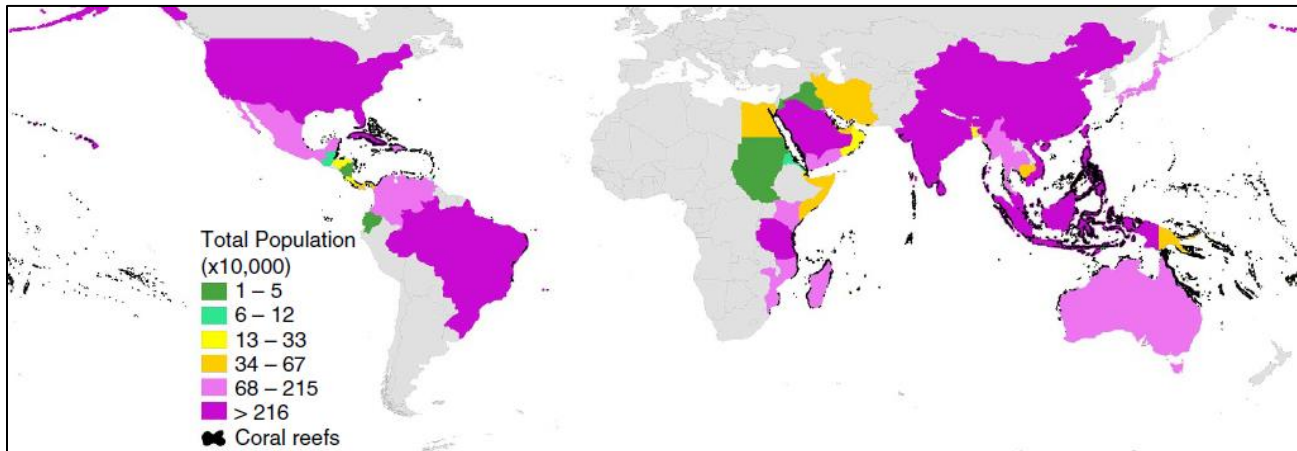
Junto con la incalculable cantidad de ecosistemas marinos que albergan, y los consiguientes servicios biológicos y ecológicos, los arrecifes de coral tienen una gran importancia en lo que respecta a la protección costera. Diversos estudios han buscado analizar el efecto que tienen las formaciones coralinas sobre el oleaje una vez que este se propaga sobre estos ambientes naturales. Aplicando una metodología de meta-análisis a nivel global, Ferrario et al. (2014) analizaron el rol de los arrecifes de coral en la atenuación de la altura de ola y las implicaciones económicas que esto puede generar. Por medio de una búsqueda de literatura llevada a cabo de forma sistemática, se identificaron 255 estudios que relacionan los arrecifes de coral con la atenuación de oleaje, logrando extraer datos para meta-análisis de 27 publicaciones independientes que analizan arrecifes a lo largo de los océanos Atlántico, Pacífico e Índico. Adicionalmente, para el estudio se analizaron de forma separada las secciones plana y cresta que componen los arrecifes de coral.

Los resultados indican que, en promedio, la energía del oleaje se reduce en un 97% por la presencia de arrecifes de coral, de la cual gran parte es debido a la cresta del arrecife, sección que en promedio puede disipar un 86% de la energía del oleaje incidente, mientras que su parte plana disipa en promedio un 65% de la energía transferida desde la cresta (Figura 4.A). En cuanto a la altura de ola, se obtiene que esta se reduce en promedio un 64% al propagarse sobre la cresta, pudiendo disminuir aproximadamente en un 84% al interactuar con todo el arrecife (Figura 4.B).



**Figura 4: Secciones de arrecife de coral y su atenuación de oleaje. A) Reducción de energía de ola y B) reducción de altura de ola (Modificado de Ferrario et al., 2014).**

Considerando áreas dentro de 10 [km] de influencia de un arrecife y terrenos con una elevación menor a 10 [m], se estima que existen 100 millones de personas que se ven beneficiadas por la reducción de energía de oleaje por presencia de arrecifes de coral. Los países más favorecidos son Indonesia, India y Filipinas, los que en conjunto abarcan aproximadamente el 50% de la población mundial que vive en terrenos de baja altura y en cercanías de costas protegidas por arrecifes de coral (Figura 5).



**Figura 5: Número de personas que se podrían favorecer por reducción de riesgos por presencia de arrecifes de coral (Fuente: Ferrario et al., 2014).**

Baldock et al. (2014) llevaron a cabo una investigación sobre las dinámicas del oleaje en arrecifes coralinos, considerando una gran cantidad de perfiles idealizados de arrecifes con presencia de laguna, representando barreras de coral bajo diferentes escenarios de aumento del nivel del mar por cambio climático. Los análisis están basados en los resultados obtenidos por medio de un modelo de oleaje unidimensional, el cual muestra que la altura de ola significativa ( $H_s$ ) disminuye a lo largo del perfil, debido principalmente a rotura y fricción, con valores de  $H_s$  que luego aumentan a lo largo de la laguna debido a la incorporación de una forzante de viento (Figura 6). También se aprecia que en presencia de un coral rugoso la disminución de altura de ola es mayor en comparación a un coral suave, lo cual se debe principalmente al aumento de fricción.

La Figura 7 muestra que la variación de la altura de ola se encuentra influenciada por la geometría del arrecife y el tipo de coral, es así como se identifica que las mayores disminuciones se obtienen para arrecifes menos profundos de corales rugosos. Si a esto se incorpora la componente de aumento del nivel del mar, se aprecia que la capacidad del arrecife para disminuir la altura de ola es menor en comparación a la situación actual, con mayores valores de  $H_s$  tanto para coral suave, como rugoso. Esto se debe principalmente a que al aumentar el nivel del mar la sección del arrecife queda más sumergida, perdiendo su capacidad de producir algún tipo de transformación sobre el oleaje incidente.

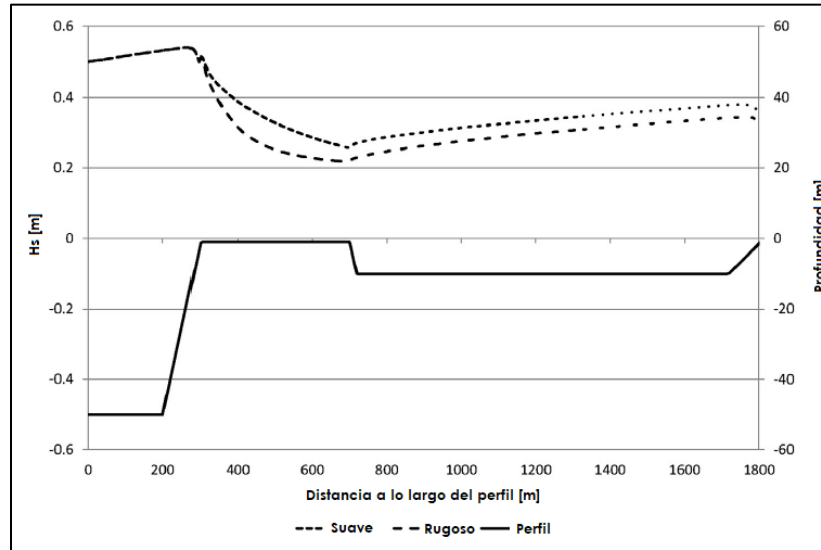


Figura 6: Variación de la altura significativa de ola ( $H_s$ ) a lo largo de un perfil idealizado, para coral suave y rugoso (Modificado de Baldock et al., 2014).

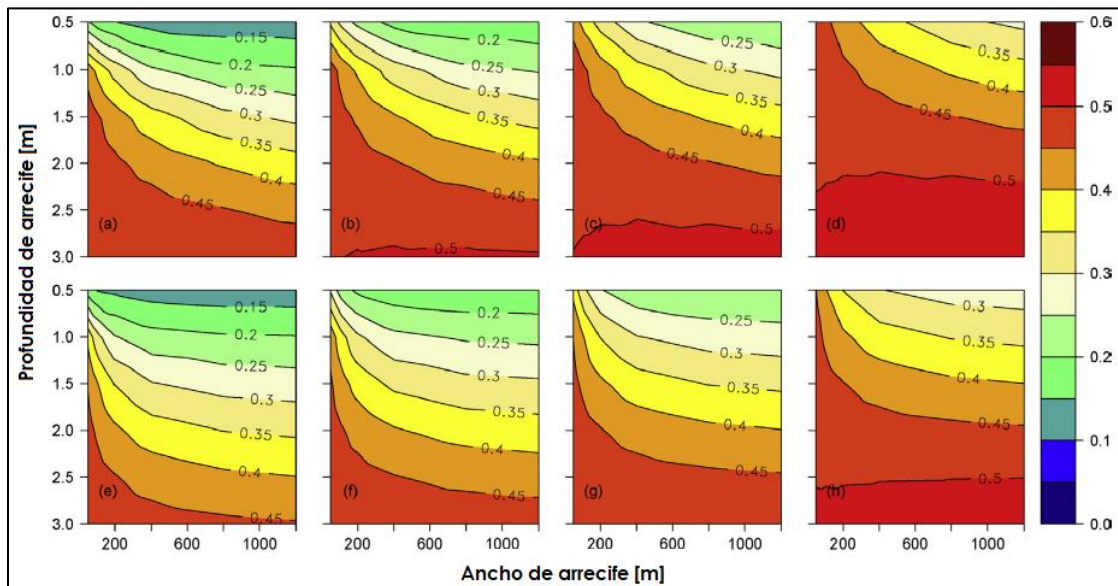
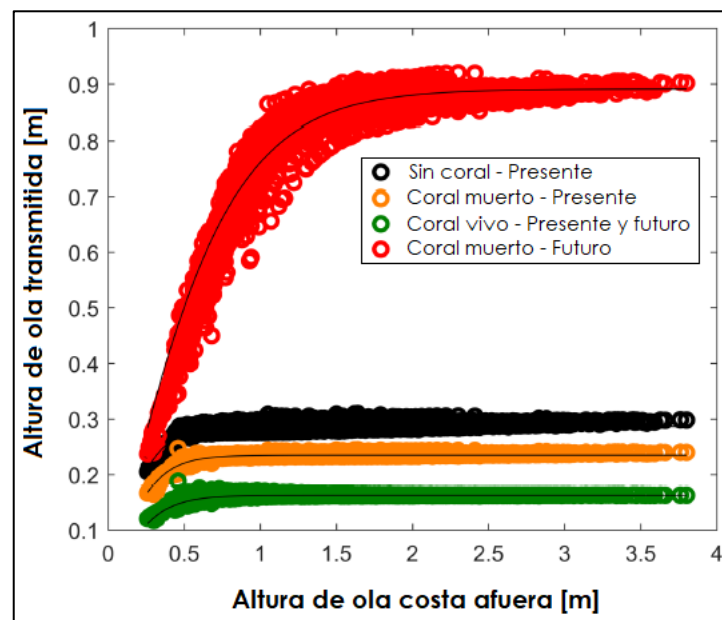


Figura 7: Variación de altura significativa de ola ( $H_s$ ) en base a profundidad y ancho variable de arrecife, para coral suave (arriba) y rugoso (abajo). Barra de colores y líneas de contorno representan  $H_s$ . El nivel del mar aumenta de izquierda a derecha, con valores de 0, 0.25, 0.50 y 1.0 [m] (Modificado de Baldock et al., 2014).

Otro estudio que considera los efectos del cambio climático corresponde al desarrollado por Guannel et al. (2016), quienes llevaron a cabo una investigación sobre la protección que aportan arrecifes de coral, algas marinas y manglares, de forma individual y combinada. Esto se lleva a cabo con perfiles idealizados de arrecifes tipo franja y barrera, en escenario actual y con proyección del aumento del nivel del mar. Los autores indican que han identificado que los arrecifes actúan como rompeolas naturales, pero que su efectividad varía dependiendo del tipo de superficie de coral que los cubre, lo que se traduce en el tipo de fricción inducida sobre el oleaje.

En condición actual y en ausencia de la cobertura de coral en los arrecifes, la altura de ola puede ser reducida en las lagunas entre un 9% y 21%. Por otra parte, los arrecifes que se encuentran cubiertos por una mayor cantidad de coral, tienen la capacidad de disipar mayor cantidad de energía. Es así como un arrecife con coral muerto transmite de un 6% a un 17% de la altura de ola incidente, mientras que un arrecife con coral vivo transmite sólo entre un 0.4% y un 12%. Bajo un escenario de aumento del nivel del mar, los arrecifes que actualmente se encuentran vivos logran mantener en cierta medida su profundidad y cobertura de coral, mientras que los arrecifes muertos se degradan rápidamente y no vuelven a crecer. Debido a esto, se espera que los arrecifes vivos mantengan su grado de atenuación de la altura de ola en las condiciones actuales y futuras. En contraparte, los arrecifes muertos perderán por completo su capa de coral y se convertirán en superficies suaves, por lo que se perderá en gran parte su capacidad de disminuir la altura de ola incidente (Figura 8).

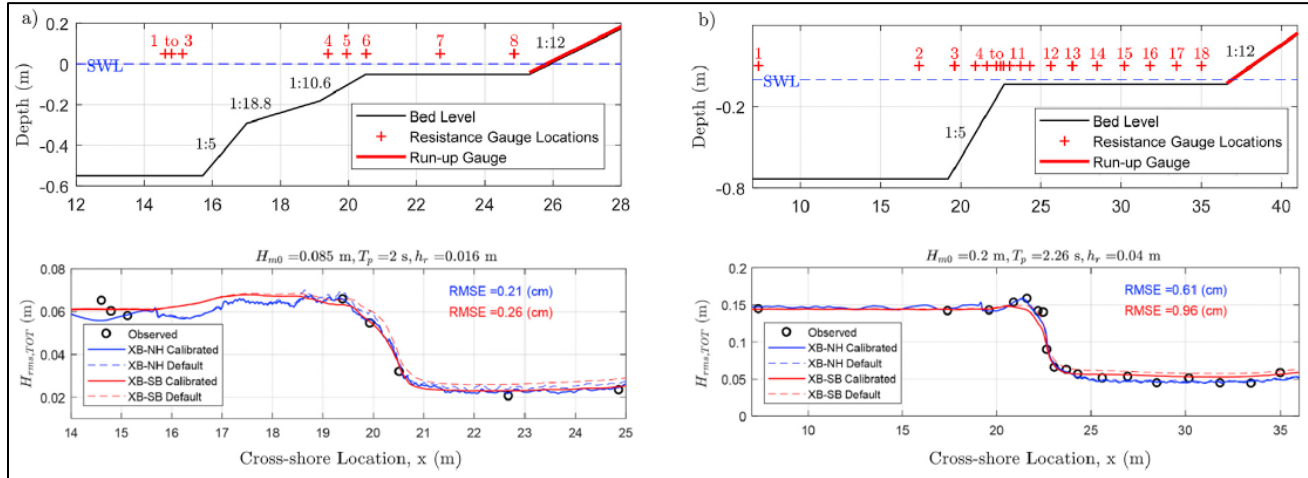


**Figura 8: Altura de ola transmitida en arrecife de coral en diferentes escenarios (Modificado de Guannel et al., 2016).**

Es posible notar que los estudios con perfiles coralinos idealizados corresponden a una herramienta útil para poder obtener una primera estimación de la efectividad de esos sistemas naturales en la atenuación del oleaje. Lashley et al. (2018) realizaron un estudio de transformación de oleaje y runup con el modelo numérico Xbeach, en sus módulos no-hidroestático (XB-NH) y surfbeat (XB-SB), considerando perfiles tipo franja parametrizados y sin rugosidad. El modelo fue calibrado para dos geometrías diferentes, según resultados obtenidos en modelos físicos llevados a cabo por Demirebilek et al. (2007) y Buckley et al. (2015).

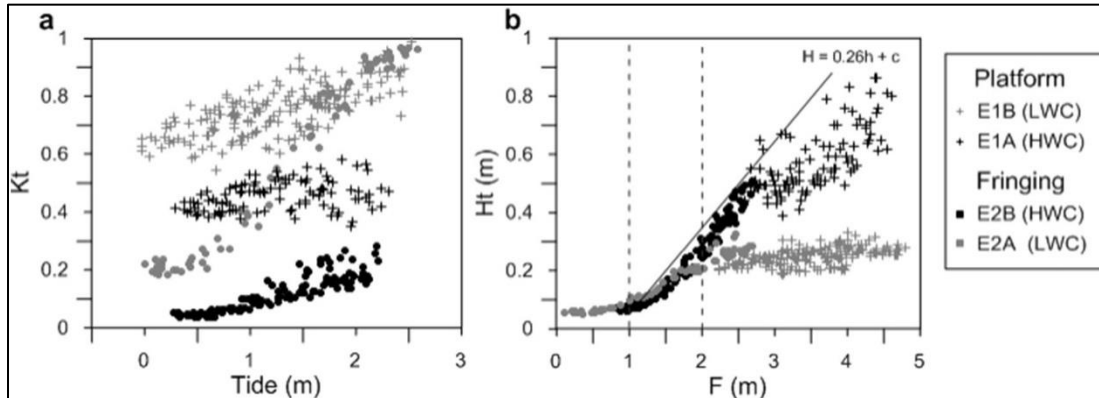


La Figura 9 muestra resultados obtenidos para altura de ola cuadrática media en ambos experimentos, en la cual es posible apreciar una disminución de la altura de ola en un 33% aproximadamente, una vez que ésta interactúa con la parte más alta del arrecife, logrando representar de buena forma los datos medidos en los modelos físicos.



**Figura 9: Perfiles tipo franja simulados y altura de ola cuadrática media total modelada. a) Experimento de Demirbilek et al. (2007); b) experimento de Buckley et al. (2015) (Modificado de Lashley et al., 2018).**

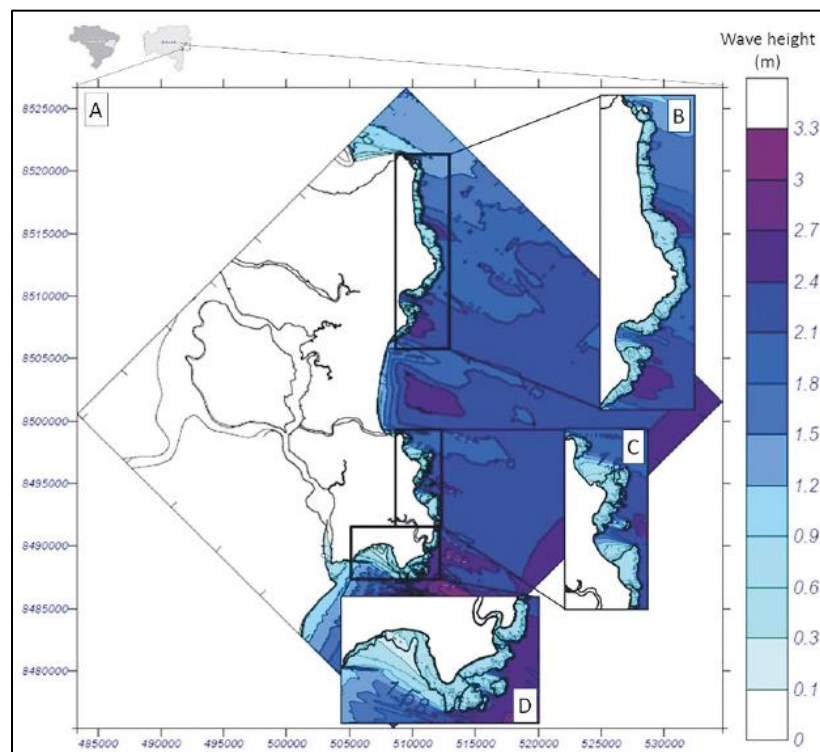
En cuanto a estudios en América Latina, Costa et al. (2015) realizaron experimentos de campo enfocados en el análisis de la influencia de la geometría de arrecifes de coral en la transformación de oleaje, específicamente en el área metropolitana de Recife (Brasil). Para esto, se llevaron a cabo mediciones de 180 perfiles batimétricos, con transectos desde la línea de costa hasta una profundidad de 20 [m]. La información obtenida fue agrupada atendiendo a la tipología del coral, para luego seleccionar dos perfiles representativos del área de interés, en los cuales se instalaron sensores de presión para obtener la altura de ola incidente y transferida. De esta forma se determina el efecto que tienen los arrecifes de coral en la transferencia de oleaje, una vez que éste se ha propagado por estos ambientes naturales. Los resultados obtenidos durante estas mediciones de campo se muestran en la Figura 10, en la cual se aprecia que el coeficiente de transmisión (ratio entre altura de ola transmitida e incidente) es menor en arrecifes tipo franja, el cual puede llegar a atenuar el 99.9% de la altura de ola incidente en condición de bajamar, mientras que el arrecife tipo plataforma puede disminuir hasta en un 67% dicho parámetro bajo las mismas condiciones (Figura 10.a). Adicionalmente, las mediciones muestran que los valores medios de altura de ola transmitida se encuentran entre 0.25 y 0.58 [m] para tipo plataforma y 0.16 a 0.23 [m] en tipo franja, mostrando que este parámetro es siempre menor en este último tipo de arrecife, con una línea de tendencia positiva entre la altura de ola transmitida y la superficie libre (Figura 10.b).



**Figura 10: a) Diagrama de dispersión entre coeficiente de transmisión ( $K_t$ ) y nivel de marea; b) altura de ola transmitida ( $H_t$ ) y superficie libre ( $F$ =elevación del arrecife-profundidad) para todos los experimentos (Fuente: Costa et al., 2015).**

También en Brasil, Elliff et al. (2019) desarrollaron un estudio de atenuación de la altura de ola y protección de la línea de costa por arrecife tipo franja en diferentes instantes de marea, en el archipiélago de Tinharé-Boipeba, ubicado en el estado de Bahía. Los análisis llevados a cabo por los autores muestran que el arrecife que rodea el archipiélago forma una barrera natural contra los oleajes de tormenta y, debido a que son el primer obstáculo que interactúa con las olas, provocan atenuación de la energía y altura del oleaje. Sin embargo, se deja en claro que esta capacidad para disminuir la intensidad del oleaje está condicionada por los instantes de marea. Durante bajamar la cresta del arrecife emerge y bloquea prácticamente por completo las olas incidentes, mientras que en momentos de pleamar los arrecifes tienen menor capacidad para disminuir la intensidad del oleaje, esto debido a que son instantes en los que se encuentran sumergidos completamente. Sin embargo, incluso en condiciones intensas de oleaje en instantes de pleamar, se identifica que los arrecifes tipo franja en el archipiélago de Tinharé-Boipeba son capaces de disminuir la altura de ola de 2.5 [m] a 0.5 [m]. Esto se muestra en la Figura 11, de la cual se desprenden los siguientes puntos principales:

- A) Vista global del campo de altura de ola en condición de tormenta durante pleamar, identificando que el arrecife de coral entrega resguardo a gran parte del territorio en estudio.
- B) Extensión del arrecife tipo franja, desde el área altamente poblada del Morro de Sao Paulo hasta la ensenada de Garapúa. En este último se aprecia como la presencia del arrecife de coral logra disminuir considerablemente la altura de ola.
- C) Zona norte de la isla de Boipeba, en la cual se encuentra la mayor cantidad de habitantes de esta isla, los que reciben protección directa por la presencia de los arrecifes.
- D) Zona sur del archipiélago, la que presenta atenuación de la altura de ola en un área importante.



**Figura 11: Campo de altura de ola en condiciones de tormenta durante pleamar en archipiélago de Tinharé-Boipeba (Fuente: Ellif et al., 2019).**

Como se ha mencionado anteriormente, la protección costera que brindan los arrecifes de coral puede llevar a mantener condiciones de estabilidad en la línea de costa. En relación a esto, Zhao et al. (2019) realizaron un estudio que evalúa el estado de las comunidades coralinas tipo franja al norte del Mar del Sur de China y su potencial en mantener estables las líneas de costa en la isla de Hainan, específicamente en las bahías de Puqian y Hainan. Utilizando información de líneas de costa entre los años 1996 y 2015, se logran identificar cambios en los sectores de interés, esto en relación a variaciones de la línea de costa (Figura 12). El norte de la bahía de Hainan ha mantenido una condición relativamente estable, a excepción de algunas acumulaciones de sedimento al medio de la bahía. Por otra parte, los cambios en la línea de costa al sur de la bahía Puqian han tenido un comportamiento complejo. Esto permite apreciar una relación directa entre el estado de los arrecifes de coral y la condición de estabilidad de la línea de costa. La costa de la bahía de Hainan ha mantenido una condición mayormente estable en los últimos 20 años y las comunidades coralinas cercanas han tenido una alta diversidad y cobertura. La erosión de la línea de costa en la bahía de Puqian parece haber sido causadas por un deterioro en la condición de los arrecifes de coral, lo que genera menor protección hacia la línea de costa, desencadenando un proceso de erosión en el sector.



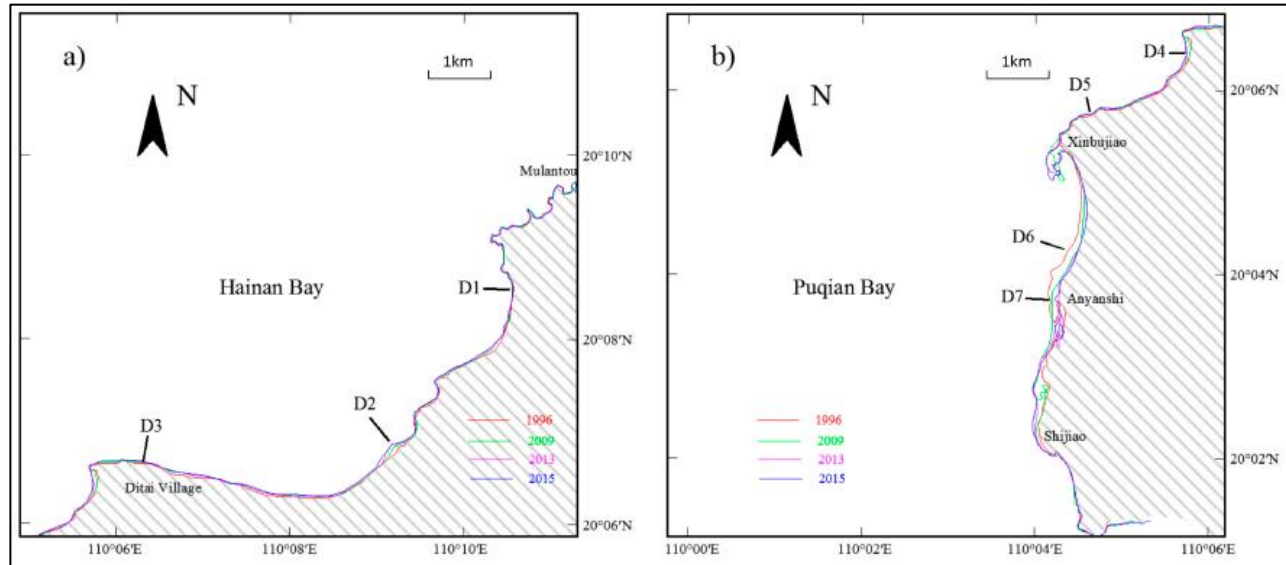
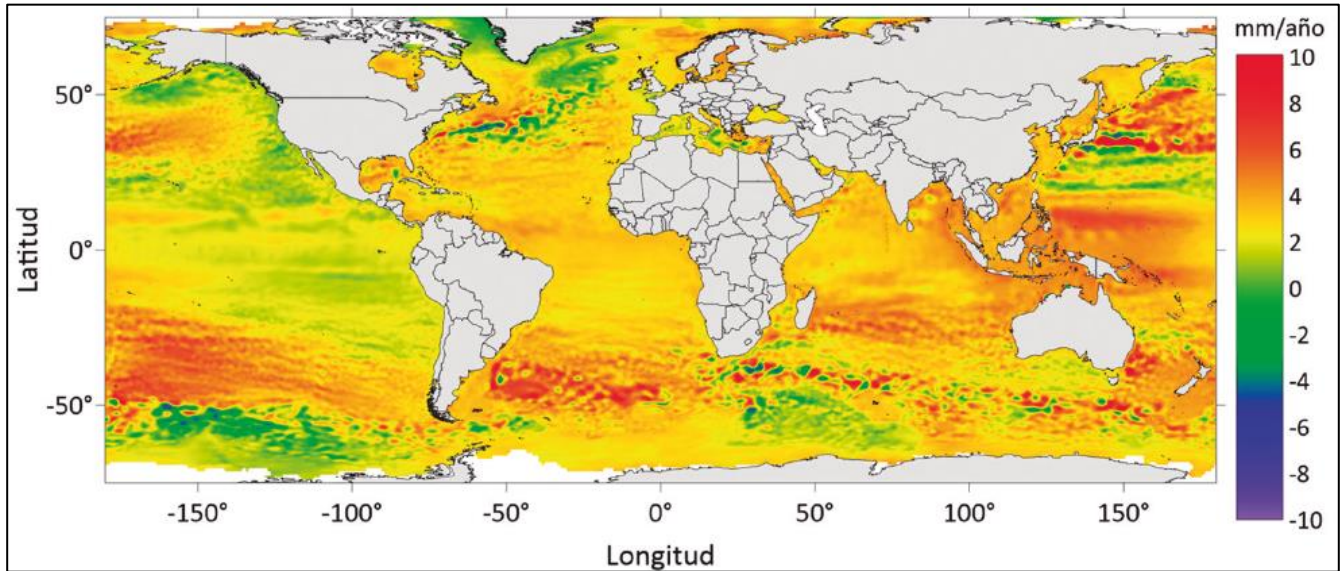


Figura 12: Evolución de línea de costa. a) Bahía de Hainan; b) bahía de Puqian (Zhao et al., 2019).

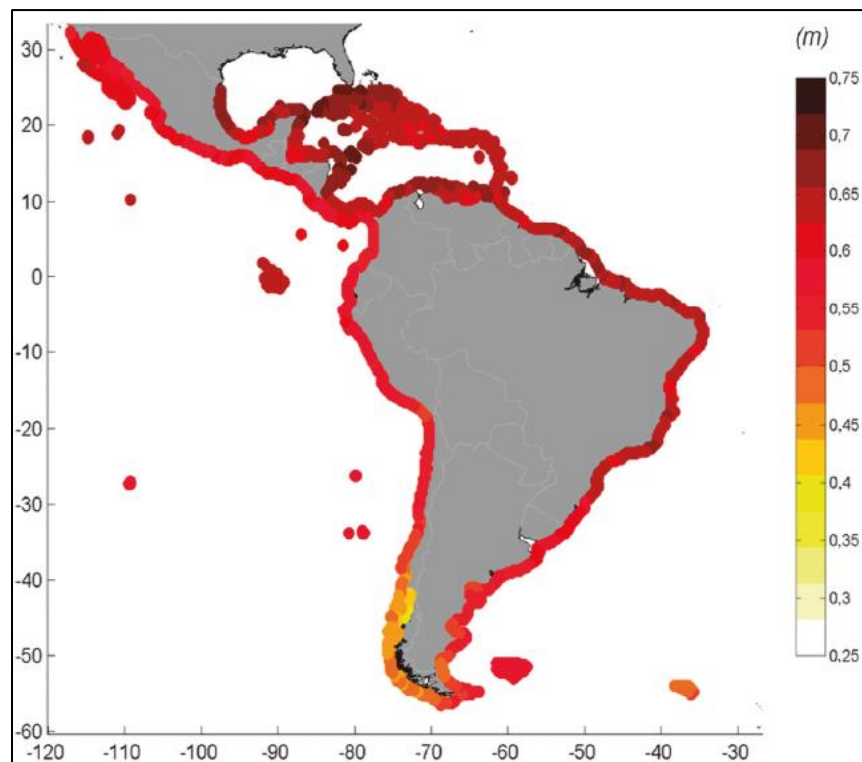
### 1.1.3 AFECCIONES SOBRE ARRECIFES DE CORAL POR CAMBIO CLIMÁTICO

Las zonas costeras son especialmente sensibles a las amenazas originadas por el cambio climático, específicamente al aumento del nivel medio del mar, al incremento de temperatura y a la acidificación del ambiente marino (Losada et al., 2020). En la Figura 13 se expone un mapa global de patrones regionales de nivel del mar observados entre los años 1992 y 2018, identificando que en gran parte del planeta existe una tendencia al aumento de este parámetro. En América Latina y el Caribe, el aumento del nivel medio del mar se estima entre 1.2 [mm/año] y 8.0 [mm/año] aproximadamente, con las mayores tasas de aumento en la costa atlántica.

En cuanto a proyecciones en la zona de América Latina y el Caribe, la Figura 14 muestra la proyección de aumento del nivel medio del mar hacia finales de siglo, bajo el escenario RCP 8.5. Se aprecia una variabilidad regional en los valores proyectados, con variaciones entre 30 y 75 [cm]. En gran parte de la costa se proyectan aumentos del nivel medio del mar superiores a 55 [cm], con valores más elevados en la costa atlántica en comparación con el sector pacífico (Losada et al., 2020).



**Figura 13:** Mapa combinado de misiones satelitales con los patrones regionales de nivel del mar observados (en mm/año) entre 1992-2018 (Fuente: Losada et al., 2020).



**Figura 14:** Proyecciones regionales multimodelo del valor medio del aumento del nivel medio del mar a fin de siglo (período 2081-2100 con respecto a 1983-2005) para el RCP 8.5 (Fuente: Losada et al., 2020).

En cuanto a la temperatura superficial del mar, ésta ha aumentado de forma significativa durante las últimas décadas, afectando a más del 70% de las costas en todo el mundo (IPCC, 2014). Entre las consecuencias de este aumento de la temperatura se encuentran cambios en la estratificación y circulación de corrientes, incremento de episodios de blanqueamiento y mortalidad de arrecifes de coral (debido a acidificación del medio marino) y ocurrencia de eventos extremos de olas de calor marinas (Losada et al., 2020).

Los arrecifes de coral y las costas rocosas dominadas por organismos calcificantes como los corales, percebes y mejillones se ven afectados actualmente por las temperaturas extremas y la acidificación de los océanos. Las olas de calor marinas ya han dado lugar a eventos de blanqueamiento a gran escala, con una frecuencia cada vez mayor, causando la degradación de los arrecifes en todo el mundo desde 1997. Los períodos prolongados de altas temperaturas y la deshidratación de los organismos, representan un alto riesgo para los ecosistemas costeros rocosos, aún más si se considera que la recuperación de estos ecosistemas es lenta, pudiendo superar los 15 años (IPCC, 2019).

Según lo demostrado por Sheppard et al. (2005) para el archipiélago de Seychelles, la protección de la línea de costa por parte de arrecifes de coral se puede ver afectada por dos motivos:

1. Aumento de la mortalidad de coral y desintegración de su estructura, causando una disminución de la elevación del arrecife.
2. Aumento progresivo del nivel del mar.

Estas dos variables, actuando de forma individual o en conjunto, resultan en un aumento de la profundidad del mar sobre el arrecife, lo que conlleva a una pérdida de la capacidad de atenuación de la altura de ola incidente (Costa et al., 2015). Considerando que la comunidad científica muestra evidencias de ocurrencia de los dos puntos mencionados, existe la posibilidad que los arrecifes de coral comiencen a disminuir su capacidad de prestar abrigo a sectores costeros, lo que puede desencadenar en una mayor vulnerabilidad ante episodios extremos de oleaje y en líneas de costa menos estables, dando paso a procesos erosivos en sectores que actualmente están protegidos por arrecifes de coral.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Analizar la protección costera proporcionada por diferentes tipologías de coral en la actualidad y considerando efectos del cambio climático en Recife (Brasil).

### **1.2.2 OBJETIVOS PARCIALES**

Para el cumplimiento del objetivo general, se plantean los siguientes objetivos parciales:

- Analizar la atenuación de oleaje proporcionada por diferentes tipologías de coral en la actualidad: para ello, se propone la utilización del modelo de detalle IH2VOF junto con un modelo de propagación, en concreto el IHPropaga. Así, será necesario realizar la validación del modelo de detalle que servirá para el evaluar la transformación del oleaje a su paso por los arrecifes de coral. El IHPropaga permitirá propagar hasta el pie del coral las condiciones actuales de clima marítimo, para posteriormente utilizar el IH2VOF y evaluar la transformación que dichas condiciones sufren al interactuar con el coral.
- Analizar la variación del servicio de protección proporcionado por diferentes tipologías de coral debido a efectos del cambio climático: para ello, el primer paso será definir los principales efectos producidos por el cambio climático que afectan a este tipo de entornos. Una vez definidas, se evaluará como dichas variables afectarán al servicio de protección costera prestado mediante la utilización del modelo de detalle.

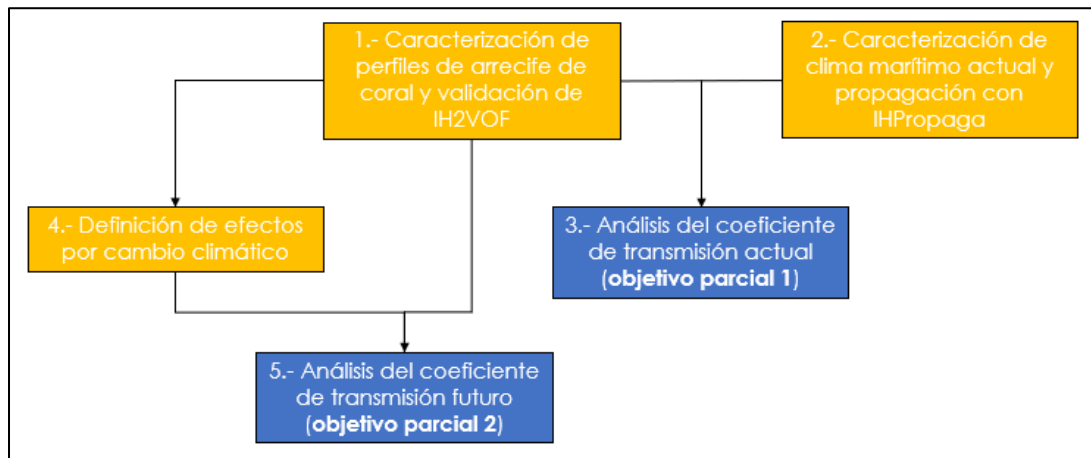
## **1.3 INFORMACIÓN UTILIZADA**

La información batimétrica y de condiciones hidrodinámicas utilizadas en el presente estudio corresponde a:

- Perfiles de arrecifes de coral disponibles en literatura, específicamente en Costa et al. (2015).
- Mediciones de parámetros de oleaje, disponibles en Costa et al. (2015).
- Información batimétrica de Recife, proporcionada por IHCantabria.
- Base de datos GOW de reanálisis de oleaje, desarrollado por IHCantabria.
- Base de datos GOT de marea astronómica, desarrollado por IHCantabria.
- Base de datos GOS de marea meteorológica, desarrollado por IHCantabria.
- Base de datos CFSR y CFSv2 de viento, proporcionada por IHCantabria.

## 1.4 METODOLOGÍA

Para llevar a cabo la consecución de los objetivos parciales, y así el objetivo general del presente estudio, se propone la siguiente metodología (Figura 15). Esta metodología se articula en diferentes pasos que se corresponden con diferentes capítulos de este trabajo. Es importante puntualizar que, la atenuación de energía del oleaje producida por entornos de coral se ha caracterizado mediante el coeficiente de transmisión. La consideración de este coeficiente viene marcada por la disponibilidad de datos medidos en campo del mismo en la zona de interés, como se verá a continuación. Los pasos llevados a cabo en la presente metodología incluyen la descripción de aspectos numéricos considerados en la ejecución de los modelos numéricos utilizados, los resultados del proceso de validación y propagación de estados de mar desde profundidades indefinidas y el posterior análisis del coeficiente de transmisión en los perfiles de arrecifes de coral.



**Figura 15: Esquema de metodología llevada a cabo.**

Cada uno de los pasos desarrollado se describen a continuación:

- **Paso 1. Caracterización de perfiles y validación del modelo IH2VOF:** en primer lugar, se describe la información batimétrica y condiciones hidrodinámicas utilizadas, ambas provenientes de Costa et al. (2015). En el caso de los perfiles batimétricos, estos han sido digitalizados desde imágenes y almacenados como archivos de texto. Con esto se han definido los mallados de cálculo, para posteriormente realizar las ejecuciones de las condiciones hidrodinámicas seleccionadas con el modelo numérico IH2VOF. Finalmente se han llevado a cabo comparaciones del coeficiente de transmisión entre los resultados del modelo mencionado y las mediciones de campo disponibles en Costa et al. (2015), comprobando el correcto desempeño del modelo. Adicionalmente, se ha llevado a cabo un análisis de la influencia de onda infragravitatoria en la propagación de oleaje sobre los arrecifes de coral en estudio, considerando componentes de oleaje irregular con periodos sobre 30 [s]. Estos resultados se exponen en capítulo 3.

- **Paso 2. Caracterización de clima marítimo actual y propagación con IHPropaga:** caracterización de condiciones de viento, nivel del mar y oleaje en profundidades indefinidas frente a Recife, basado en régimen medio y extremal. Luego, se describe el método de propagación de oleaje, se seleccionan estados de mar de interés y se obtienen las condiciones de oleaje frente a los perfiles de arrecifes de coral en estudio, las que finalmente serán las condiciones hidrodinámicas iniciales para el análisis del coeficiente de transmisión. Los resultados de este paso se presentan en capítulo 4.
- **Paso 3. Análisis del coeficiente de transmisión actual:** ejecución del modelo IH2VOF con las condiciones de oleaje incidente resultantes del paso 2. Se obtiene la altura de ola transmitida a lo largo de los perfiles en estudio y se analiza el coeficiente de transmisión para las diferentes condiciones de oleaje y marea, resultados que se exponen en capítulo 5.
- **Paso 4. Definición de efectos por cambio climático:** con base en la evidencia científica, se definen los efectos por cambio climático en la zona de Recife. En primer lugar, se establece el aumento del nivel del mar proyectado hacia fines de siglo, bajo un escenario pesimista, como lo es RCP 8.5. Luego, se especifica la disminución en el área de coral, lo que provoca un aumento de su profundidad, condicionando su capacidad para atenuar la altura de oleaje incidente.
- **Paso 5. Análisis del coeficiente de transmisión futuro:** nueva ejecución de IH2VOF con estados de mar provenientes del paso 2, pero esta vez considerando los efectos por cambio climático, lo que incluye aumento del nivel medio del mar y disminución en la elevación de los arrecifes de coral. Con esto, se analizan variaciones del coeficiente de transmisión en comparación a lo obtenido en el paso 3, lo que permite identificar el grado de afección sobre la capacidad de atenuar la altura de ola incidente por parte de los arrecifes de coral. Estos resultados se exponen en capítulo 5.

## 2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona del interés del presente estudio se encuentra en el área metropolitana de Recife, en el estado de Pernambuco, al NE de Brasil (Figura 16). El territorio brasileño comprende un área aproximada de 8547403.5 [km<sup>2</sup>], con una costa que se extiende desde el río Oyapoque (4.18° N) al arroyo de Chuy (33.75° S). La costa brasileña posee una longitud cercana a 8500 [km], lo que representa el 32% de las fronteras brasileñas (Scherer et al., 2011).

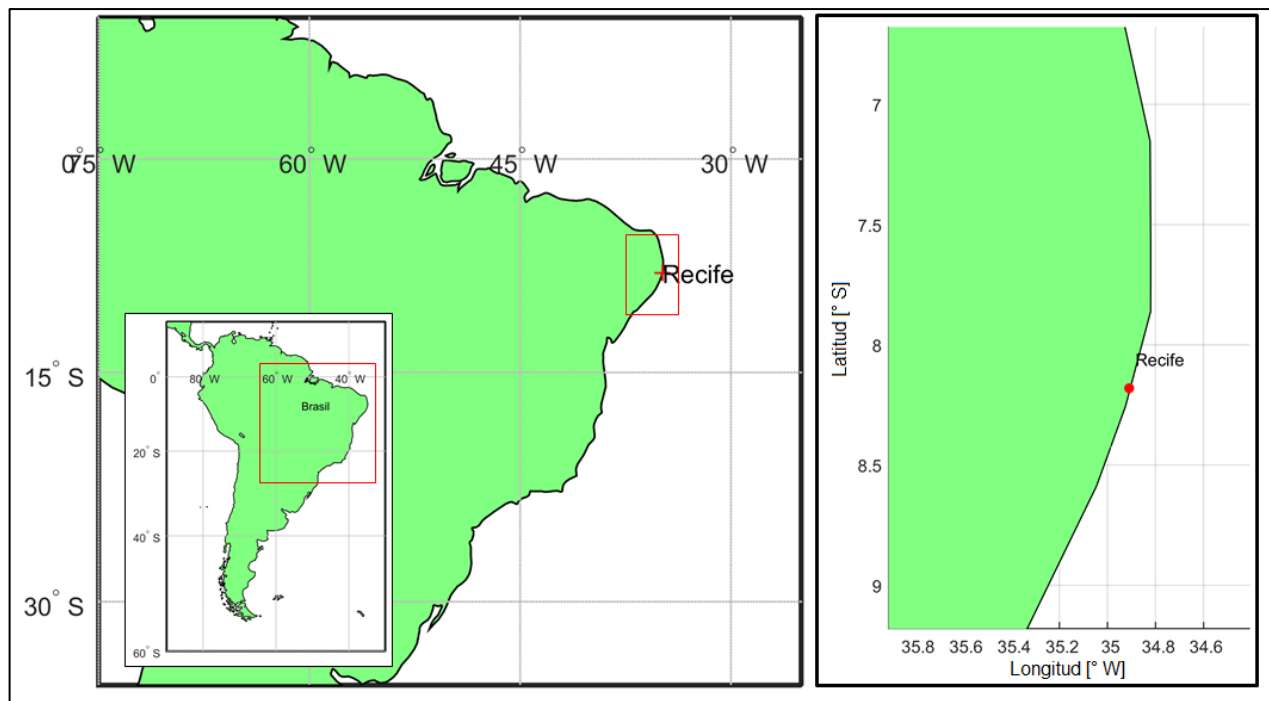
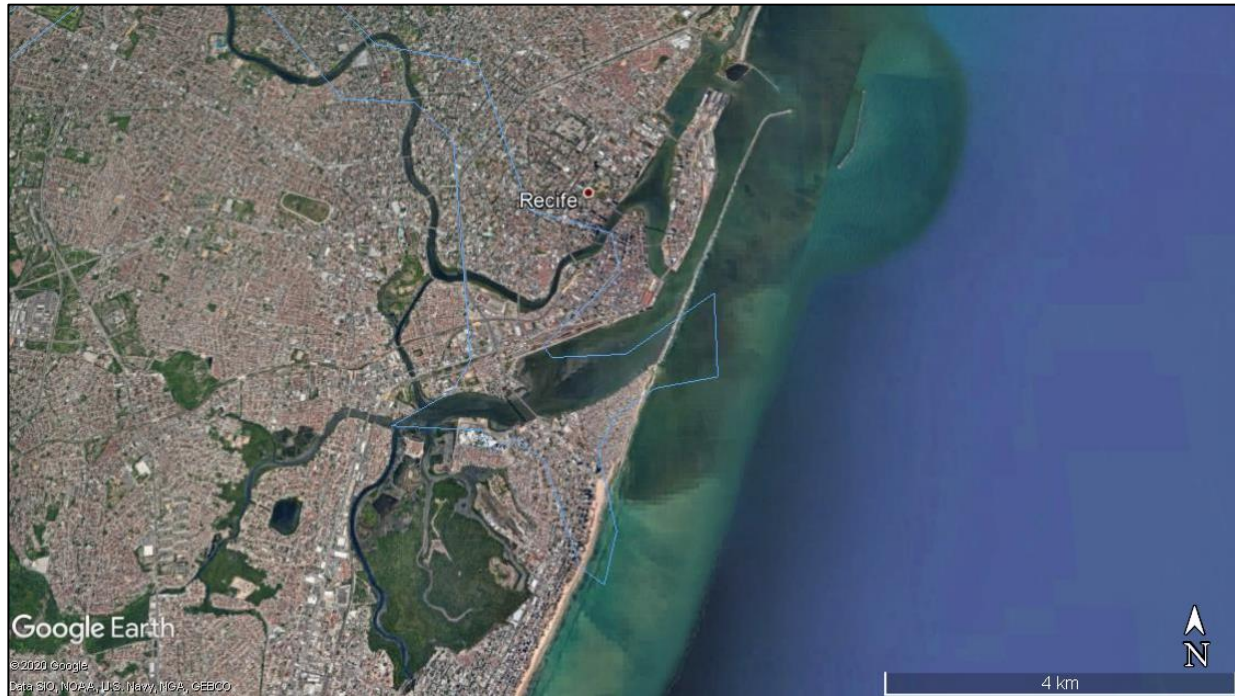


Figura 16: Cuadro de ubicación general de zona de estudio.

El área metropolitana de Recife posee la mayor densidad poblacional a lo largo de la costa de Brasil, lo que implica una intensa urbanización. Con 18 [km] de costa, aproximadamente el 40% de los sectores posteriores de las playas de Recife se encuentran bajo la influencia de estructuras costeras, como muros o espigones (Costa et al., 2015). Esto queda en evidencia en la Figura 14, con una línea de costa relativamente recta y un alto nivel de urbanización, con muros y vías de tránsito vehicular y peatonal prácticamente a lo largo de todo el borde costero.





**Figura 17: Zona costera de Recife.**

A lo largo del sector costero de Brasil, los arrecifes de coral se encuentran orientados de forma paralela a la costa, con ubicaciones y morfologías asociadas a la presencia de sectores rocosos, con zonas en las cuales existen hasta tres líneas o tipos de arrecifes. Los arrecifes que se encuentran expuestos a cambios significativas del nivel de marea pueden variar su longitud de 1.0 [km] a 4.0 [km], mientras que los arrecifes sumergidos pueden tener una longitud de hasta 10 [km], con crestas que se encuentran entre 4.0 [m] y 8.0 [m] de profundidad (Dominguez et al., 1990).

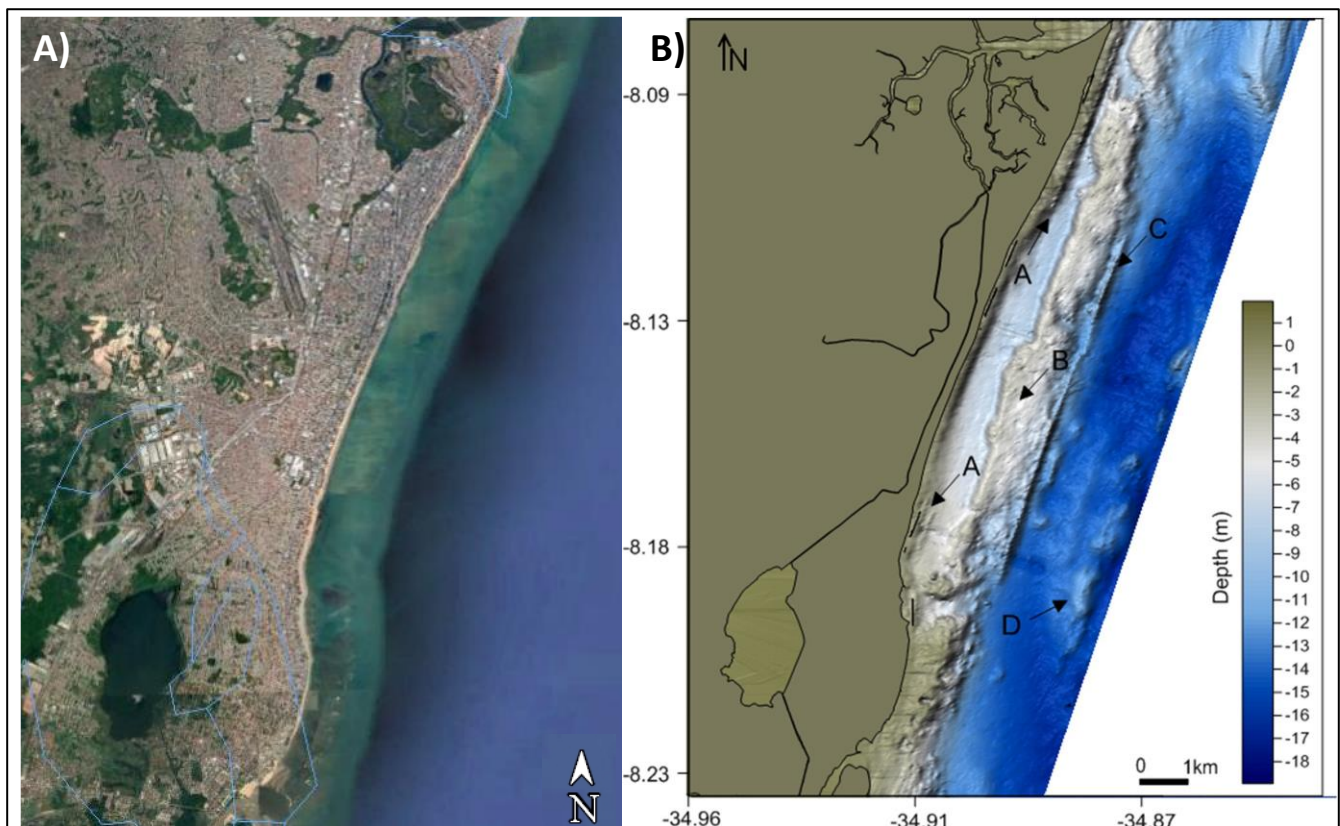
Específicamente en la zona de estudio (Figura 18.A), la información batimétrica disponible muestra cuatro líneas o sectores de arrecifes de coral, las cuales han sido diferenciadas con las letras A, B, C y D (Figura 18.B). Estos cuatro sectores presentan patrones típicos de arrecifes de coral de la costa tropical de Brasil, con formas alargadas y paralelas a la costa y variaciones en su ancho y extensión, lo cual se describe a continuación (Costa et al., 2015):

- Tipo A: esta primera línea de arrecife se ubica cerca de la playa y se separa en dos partes, un segmento hacia el sur de 850 [m] de largo y un segundo tramo al norte con extensión de 3600 [m], ambos con un ancho aproximado de 95 [m].
- Tipo B: línea de arrecife continua, con 18 [km] de largo y 1 [km] de ancho aproximadamente. La variabilidad geométrica que presenta se encuentra en función de la profundidad de la parte superior (o cresta) del arrecife y la presencia o ausencia de una laguna. En la parte norte, la línea del arrecife está separada 800 [m] desde la playa y se encuentra completamente sumergido, con profundidades de la cresta que varían entre 4.0 y 6.0 [m] en bajamar. La laguna detrás del arrecife tiene una profundidad promedio de 7.0 [m], con



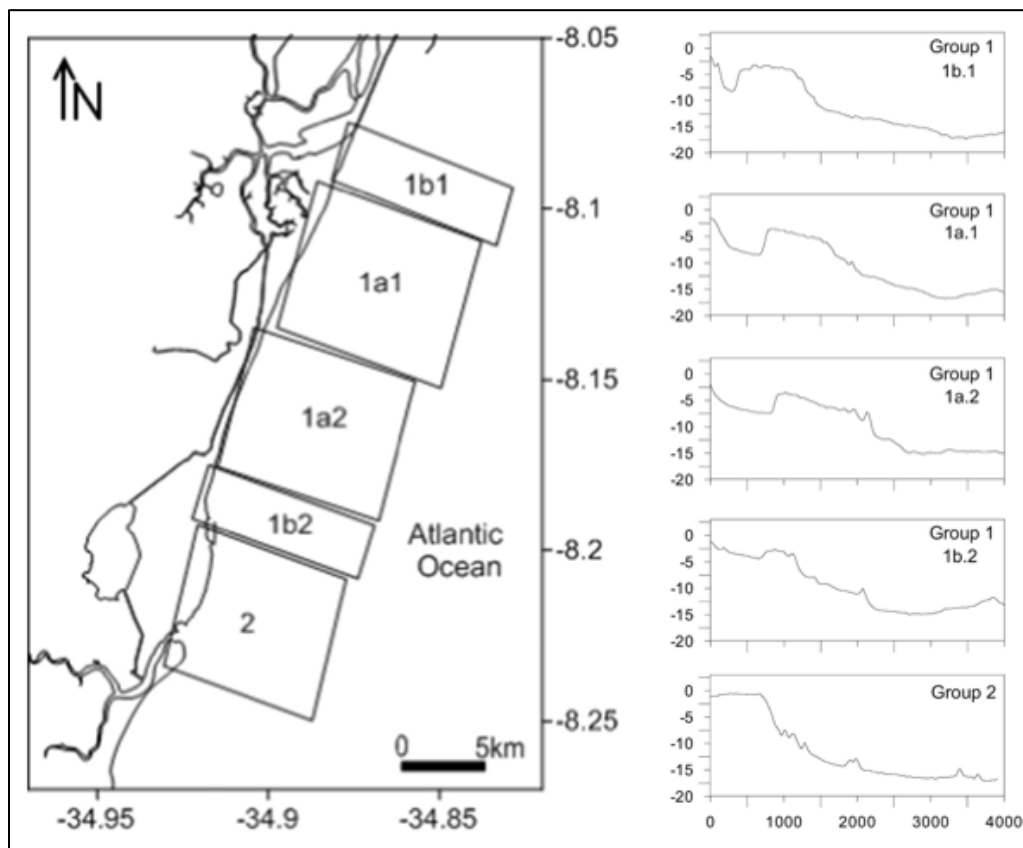
profundidades que disminuyen gradualmente hacia el sur. Precisamente el tramo sur de esta línea de arrecife es menos profunda, alcanzando 3.0 [m] en pleamar en sicigia, exponiéndose parcialmente en bajamar de sicigia. La zona entre el arrecife y la playa es plana y muy somera, sin presencia de laguna en la parte posterior del arrecife.

- Tipo C: ubicado a lo largo del veril de 10 [m], esta línea de arrecife posee 250 [m] de ancho y 8000 [m] de largo. En algunos sectores se encuentran unidos a la línea de arrecife tipo B.
- Tipo D: esta línea de arrecife se encuentra a una distancia aproximada de 4500 [m] desde la playa. Posee 800 [m] de ancho y 6600 [m] de largo, alcanzando 13 [m] de profundidad aproximadamente.



**Figura 18:** Zona de estudio específica. A: vista en ambiente Google Earth; B: superficie batimétrica zona de estudio. Sectores de arrecifes se representan con las letras A, B, C y D (Modificado de Costa et al., 2015).

En la Figura 19 se muestra un agrupamiento espacial de la información batimétrica en la zona de estudio. Esto ha sido realizado por Costa et al. (2015), aplicando el índice de similitud de Bray-Curtis a 180 perfiles de arrecifes de coral medidos para dicho estudio. Es posible identificar que los perfiles del sector norte (1b.1, 1a.1 y 1a.2) poseen una laguna entre la línea de costa y el arrecife, mientras que para los perfiles de la zona sur (1b.2 y 2) esto comienza a ser menos notorio, presentando un arrecife tipo franja en el extremo sur, el cual se encuentra unido a la línea de costa.



**Figura 19: Tipos de perfiles de arrecifes de coral en zona de estudio. Izquierda: mapa de distribución espacial y denominación de grupos; derecha: perfiles de arrecifes por grupo (Modificado de Costa et al., 2015).**

### **3 DEFINICIÓN DE LOS PERFILES DE CORAL Y VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO IH2VOF**

El primer paso dentro del presente estudio consiste en definir las tipologías de coral a estudiar y posteriormente validar la capacidad que tiene el modelo numérico IH2VOF en la propagación de oleaje a lo largo de las mismas. Para esto, en este capítulo se define la información batimétrica junto con las condiciones hidrodinámicas para validación, ambas provenientes de mediciones en terreno disponibles en Costa et al. (2015). Además, se establece el mallado numérico a considerar y se presentan los resultados obtenidos. En Anejo 9.1 se adjunta una descripción detallada del modelo IH2VOF, con su fundamento teórico y numérico.

#### **3.1 INFORMACIÓN BATIMÉTRICA Y CONDICIONES HIDRODINÁMICAS**

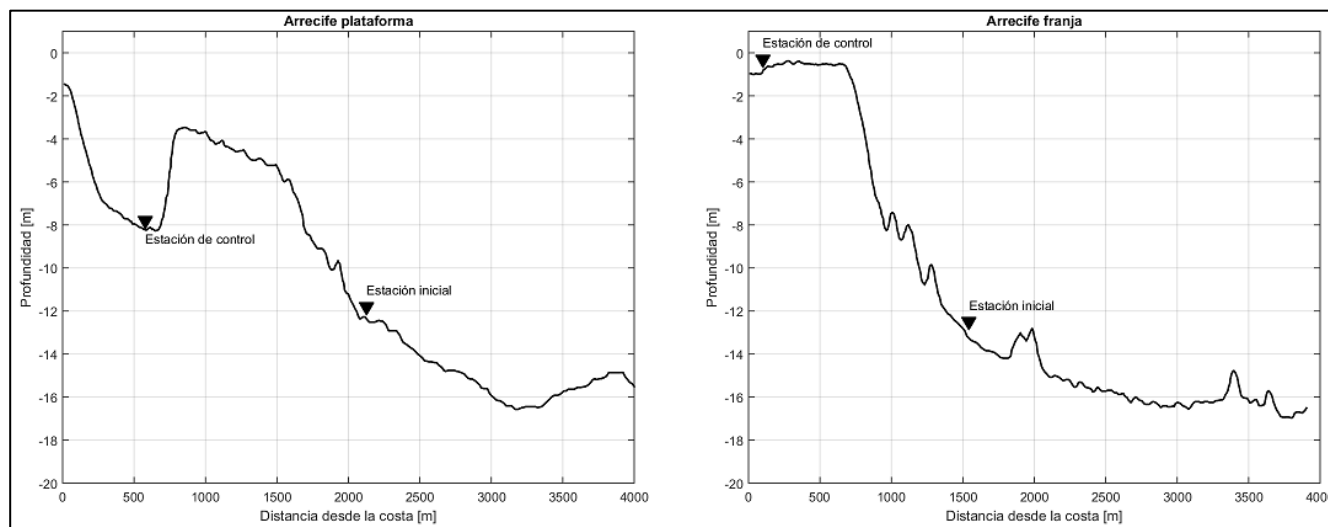
##### **3.1.1 DATOS DE PARTIDA**

Dado que uno de los objetivos de este estudio es evaluar la influencia que tiene la forma del arrecife de coral en la transformación de oleaje que produce, se consideran dos tipologías de arrecife haciendo uso de la información batimétrica proporcionada por Costa et al. (2015). En este estudio se definen dos perfiles batimétricos correspondientes a arrecifes tipo plataforma y franja (Figura 20). Dichos perfiles se consideran representativos de las áreas norte y sur del arrecife ubicado en Recife, respectivamente<sup>4</sup>. Ambos perfiles poseen aproximadamente 4 [km] de longitud, presentando su principal diferencia en la elevación que poseen en sus crestas, así como en la posición de las mismas respecto a la línea de costa. La elevación de la cresta del perfil tipo plataforma se encuentra a 5.9 [m] de profundidad, mientras que el arrecife franja tiene su cresta a 0.58 [m] de profundidad, ambos valores en el sector hacia aguas afuera. Esto será un factor relevante a la hora de comparar la capacidad que tienen los perfiles de atenuar la altura de ola incidente, ya que la cresta del arrecife es la sección que induce los procesos de transformación de mayor pérdida energética, incluyendo rotura de oleaje.

Para la evaluación de la transformación de oleaje se dispone de sensores de presión frente (estación inicial) y detrás (estación de control) de los perfiles de arrecife (Figura 20). Esta información entrega series de tiempo de desnivelaciones, las cuales posteriormente han sido procesadas para obtener alturas de ola, proceso cuyo resultado se entrega en Costa et al. (2015). De esta forma, es posible obtener las condiciones de oleaje incidente y transferido a lo largo de los perfiles y llevar a cabo comparaciones entre los datos medidos en campo y los resultados del modelo IH2VOF, lo que finalmente consiste en el proceso de validación.

---

<sup>4</sup> Descripción realizada en capítulo 2.



**Figura 20: Perfiles de arrecife de coral y estaciones de medición (Modificado de Costa et al., 2015).**

### 3.1.2 DOMINIO GEOMÉTRICO

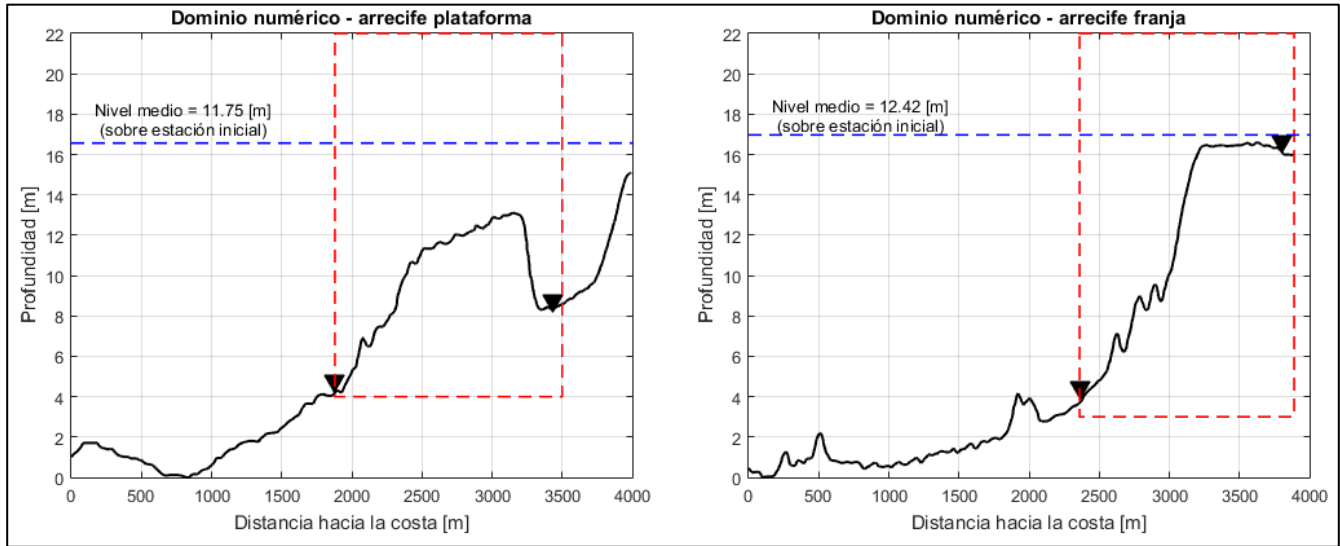
Considerando que la estación inicial representa la altura de ola significativa incidente ( $H_i$ ) antes de alcanzar el arrecife y que la estación de control entrega la altura de ola significativa transmitida ( $H_t$ ), en el eje horizontal se han definido dominios numéricos entre dichas estaciones de medición y en eje vertical el límite inferior se establece desde la estación inicial. Esto permite centrar las modelaciones en el área en la cual se poseen datos de campo, además de optimizar los recursos computacionales.

Adicionalmente, en el eje vertical se ha considerado un dominio entre 4.0 y 5.0 [m] sobre la profundidad media de la estación inicial, para poder analizar diferentes niveles de marea y que el oleaje se encuentre contenido dentro del dominio numérico ante un posible proceso de asomeramiento, permitiendo su correcta representación.

Los dominios numéricos considerados se muestran en la Figura 21, cuyos límites geométricos se especifican en la Tabla 1, resultando en una extensión de los dominios de 1620 [m] en el arrecife tipo plataforma y de 1530 [m] para el arrecife tipo franja, con alturas que varían entre los 17 y los 19 [m].

**Tabla 1: Posiciones de inicio y fin de los dominios numéricos.**

Geometría	Dirección X [m]		Dirección Y [m]	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Arrecife tipo plataforma	1880	3500	4.0	22
Arrecife tipo franja	2360	3890	3.0	22



**Figura 21: Dominios numéricos considerados representados con línea roja discontinua.**

### 3.1.3 CONDICIONES HIDRODINÁMICAS

Como se ha mencionado anteriormente, la información disponible para las condiciones hidrodinámicas corresponde a parámetros de oleaje incidente y transmitido entre las estaciones de medición inicial y de control. Además, se cuenta con los datos de nivel de marea, profundidad de la columna de agua y elevación del arrecife. Con esto es posible determinar el coeficiente de transmisión ( $K_t$ ) y el calado sobre el arrecife ( $F$ ), para las que se tienen las siguientes expresiones:

$$K_t = H_t / H_i$$

$$F = h - d$$

Donde:

- $H_t$ : altura de ola significativa transmitida [m].
- $H_i$ : altura de ola significativa incidente [m].
- $h$ : elevación del arrecife con respecto a la elevación a la que se encuentra la estación inicial [m], con valores de 10.72 [m] y 8.20 [m] en arrecifes franja y plataforma respectivamente.
- $d$ : profundidad en la estación inicial [m].

En primera instancia se planteó ejecutar el modelo IH2VOF para condiciones de oleaje medio y de tormenta en cada uno de los perfiles en estudio. Sin embargo, como se expone en el capítulo 3.2, la definición del mallado numérico está condicionado por la altura de ola a simular. Esto hace que, para una baja altura de ola, se necesite un tamaño de celda pequeña. Considerando que los dominios numéricos tienen una extensión aproximada entre 1500 y 1600 [m] y alturas entre 17 y 19 [m], existen condiciones de oleaje de baja intensidad que requieren una capacidad computacional que no se posee para este trabajo. Debido a esto, para el arrecife tipo plataforma se ha ejecutado un

caso de validación basado en condiciones de tormenta, ya que la altura de oleaje medio para este perfil provoca que la cantidad de celdas necesarias en el modelo numérico no sea factible para el recurso computacional disponible. Por otra parte, para el arrecife tipo franja se ha logrado definir y ejecutar condiciones para oleaje medio y de tormenta.

Las condiciones de oleaje a ejecutar en el modelo IH2VOF para el proceso de validación se presentan en las Tablas 2 y 3, utilizando las nomenclaturas expuestas en Costa et al. (2015). Cabe destacar que las profundidades en la estación inicial corresponden a los valores medios, a lo cual se ha sumado el nivel de marea especificado en cada caso. Además, es importante señalar que no se ha agregado rugosidad a la superficie de los arrecifes y que las condiciones simuladas corresponden a series de oleaje irregular considerando un espectro JONSWAP con factor de apuntalamiento  $\gamma = 3.3$  y una duración de 3600 [s], lo que permite simular estados de mar de 1 [hr]. La altura de ola transmitida es obtenida aplicando el método de pasos ascendentes por cero a las series de superficie libre de los puntos de control, los que se definen en capítulo 3.3.

**Tabla 2: Condiciones iniciales de oleaje para validación, arrecife plataforma.**

Caso	$H_i$ [m]	T [s]	Marea [m]	h [m]	d [m]	F [m]
E1A tormenta	2.11	8.97	1.25	8.2	11.75	4.80

**Tabla 3: Condiciones iniciales de oleaje para validación, arrecife franja.**

Caso	$H_i$ [m]	T [s]	Marea [m]	h [m]	d [m]	F [m]
E2B medio	1.87	6.38	1.26	10.72	12.42	2.96
E2B tormenta	2.69	9.23	2.21	10.72	12.42	3.91

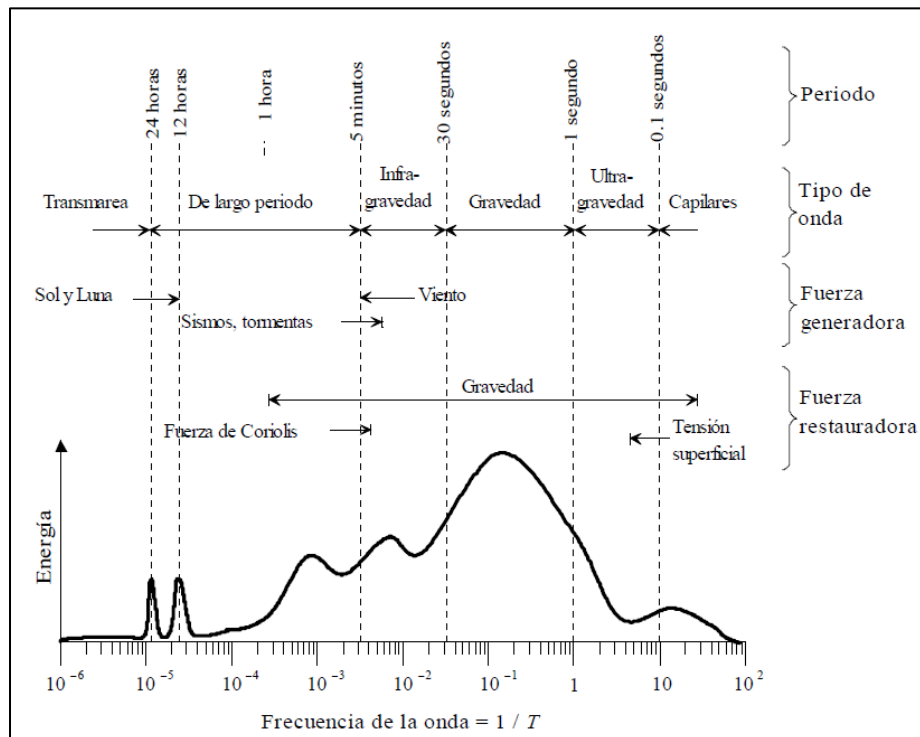
### 3.1.4 CONDICIONES HIDRODINÁMICAS CON COMPONENTES DE SEGUNDO ORDEN

Un aspecto que puede tener una especial relevancia en estos ambientes es la transformación de la onda larga en los mismos (Roeber y Bricker, 2015). La rotura del oleaje producida por la cresta coralina disipa principalmente la energía de onda corta, mientras que la energía asociada a baja frecuencia (onda larga), no se ve significativamente afectada por este proceso de rotura, propagándose tras la cresta coralina. Este proceso es de especial relevancia en la evaluación del run-up producido en la costa. Aunque el presente estudio no aborda dicho aspecto, se ha querido realizar una estimación de la influencia que puede tener dicha transformación en el coeficiente de transmisión. Para ello, se han utilizado las condiciones hidrodinámicas incidentes especificadas anteriormente, y se han realizado unas nuevas simulaciones considerando generación de segundo orden. De esta forma, se ha generado el oleaje de onda corta junto con la onda larga ligada al grupo y se ha introducido esta nueva condición de oleaje en el contorno de generación. Esto permitirá evaluar la influencia de esta energía de onda larga en el coeficiente de transmisión, variable clave en el presente estudio.

Para considerar las alturas de ola asociadas a onda infragravitatoria, estas son calculadas mediante los espectros de frecuencia en los puntos inicial y de control, los cuales se obtienen aplicando la transformada rápida de Fourier (FFT) a las series de superficie libre. Posteriormente, se analiza la evolución de la altura de ola significativa espectral, la cual se define como:

$$H_{m0} = 4 * \sqrt{m_0}$$

Donde  $m_0$  es el momento de orden cero que se corresponde con el área bajo la curva del espectro. Este cálculo se ha realizado en cada uno de los puntos de control, para el espectro completo y para una porción del espectro que considera sólo las bajas frecuencias, lo que representa el aporte de las ondas infragravitatorias. En relación a este último punto, como ondas infragravitatorias se han considerado aquellas con periodos de onda sobre 30 [s], según la distribución energética de ondas de superficie expuesta en la Figura 22.



**Figura 22: Distribución energética de las ondas de superficie (Fuente: UNICAN, 2000).**



## 3.2 MALLADO NUMÉRICO

En el modelo IH2VOF, la definición del mallado numérico se encuentra condicionado por la altura de ola a simular, la cual debe estar definida por una cantidad de 10 celdas aproximadamente. Por lo tanto, el tamaño de celdas en el eje vertical estará dada por la relación  $\Delta y = H_i/10$ .

Adicionalmente, la relación entre los incrementos de los ejes x e y debe ser mayor a 1 y menor a 5, es decir:  $1 < \Delta x/\Delta y < 5$ . En el caso del presente trabajo se ha utilizado una relación de  $\Delta x/\Delta y \leq 3.0$ . Esto permite mantener las condiciones mínimas del modelo, representando de buena forma los procesos de transformación de oleaje y optimizando los recursos computacionales. Como tercer criterio, la longitud de onda es representada por al menos 100 celdas.

En la definición del mallado numérico se han considerado mallas uniformes, tanto en X como en Y. Esto implica que los tamaños de celda son constantes en todo el dominio en cada una de las direcciones. Adicionalmente, se ha considerado absorción en lados izquierdo y derecho, evitando posibles procesos de reflexión.

### 3.2.1 ARRECIFE PLATAFORMA

Como se indicó en capítulo 3.1.3, para el proceso de validación del arrecife plataforma se ha realizado la ejecución de una condición de oleaje, correspondiente a una condición de tormenta, con altura de ola inicial de 2.11 [m]. Con esto se obtienen los tamaños de celda  $\Delta y = 0.2$  y  $\Delta x = 0.6$ .

Considerando que el periodo de ola de este caso es de 8.97 [s], a una profundidad total de 13 [m], se tiene una longitud de onda de 90 [m]. Con el tamaño de celda horizontal de 0.6 [m], se obtiene una representación de la longitud de onda por 150 celdas.

### 3.2.2 ARRECIFE FRANJA

Para el arrecife tipo franja, en primer lugar se ha definido el mallado de la condición media, cuya altura de ola inicial es de 1.87 [m], obteniendo tamaños  $\Delta y = 0.18$  y  $\Delta x = 0.5$ . Con periodo de 6.38 [s], a una profundidad total de 13.68 [m], la longitud de onda es de 57 [m]. Luego, el tamaño de celda horizontal de 0.5 [m] representa la longitud de onda por 114 elementos.

En el caso de la condición de tormenta, la altura de ola inicial corresponde a 2.69 [m], definiendo los valores de celda  $\Delta y = 0.25$  y  $\Delta x = 0.75$ . El periodo de ola de este caso es de 9.23 [s], a una profundidad total de 14.63 [m], obteniendo una longitud de onda de 98 [m]. Con tamaño de celda horizontal de 0.75 [m], la representación de la longitud de onda se lleva a cabo por 130 celdas.



### 3.3 ARCHIVOS DE SALIDA

La comparación entre los datos medidos en campo en Costa et al. (2015) y los resultados obtenidos con el modelo IH2VOF estarán basados en la obtención de las alturas de ola incidente y transmitida, lo que posteriormente permite determinar el coeficiente de transmisión.

Por lo tanto, en primer lugar es necesario establecer los puntos de control, los cuales deben coincidir con las estaciones inicial y de control. En capítulo 3.1.1 (Figura 20) se han mostrado las ubicaciones gráficas de dichas estaciones, desde las cuales se plantean puntos de control cada 100 [m], desde la estación inicial hasta la estación de control, lo que permite analizar el proceso de propagación a lo largo de todo el perfil. Estos puntos se muestran en la Figura 23, en la cual se ha acotado el perfil dentro del dominio geométrico descrito en capítulo 3.1.2.

La comparación en arrecife plataforma se realiza entre los puntos 1 y 17, mientras que para arrecife tipo franja esto se lleva a cabo en los puntos 1 y 14. Para el cálculo de coeficiente de transmisión se obtiene la serie temporal de superficie libre en cada punto, con la cual es posible obtener los valores de altura de ola a lo largo de la serie aplicando el método de pasos ascendentes por cero. Finalmente, se realiza el cálculo de la altura de ola significativa ( $H_s$ ), la cual se define como el promedio del tercio superior de todas las alturas de ola de la serie de desnivelaciones.

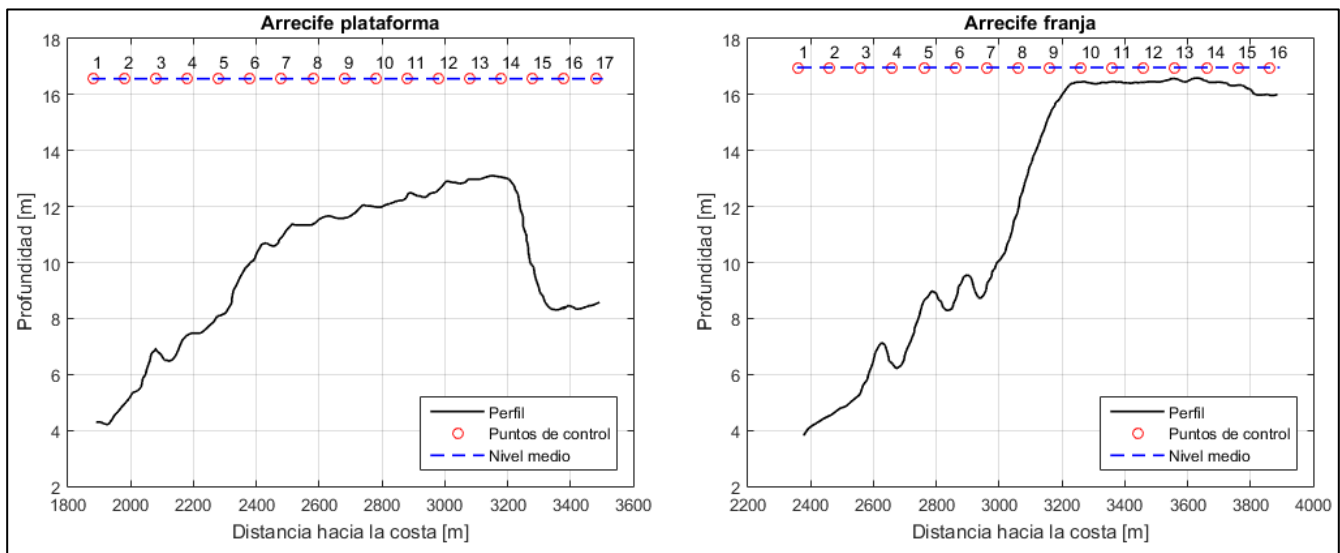


Figura 23: Ubicación puntos de control en perfiles de arrecifes de coral en estudio.

### 3.4 RESULTADOS DE VALIDACIÓN

Luego de obtener la información batimétrica y definir las condiciones hidrodinámicas, se han realizado simulaciones con IH2VOF para los casos de validación con la información disponible en Costa et al. (2015), cuyos resultados se muestran en la presente sección.

#### 3.4.1 VALIDACIÓN ARRECIFE PLATAFORMA

Como se ha indicado anteriormente, para esta geometría se ha ejecutado sólo un caso en condición de tormenta, cuya nomenclatura es E1A\_tormenta. Dentro de la información expuesta en Costa et al. (2015) no se especifican los valores exactos de altura de ola transmitida y coeficiente de transmisión para estas condiciones y debido a que la atenuación de la altura de ola se encuentra condicionada por el instante de marea a considerar, en los resultados expuestos en la Tabla 4 se indican rangos de los parámetros de oleaje medidos en campo para su comparación.

Los resultados obtenidos mediante el modelo IH2VOF muestran que éste se logra ajustar al límite superior del coeficiente de transmisión obtenido en mediciones de campo, mostrando que para una condición de tormenta y un nivel de marea de 1.25 [m], la altura de ola se logra atenuar en un 40% a lo largo del arrecife plataforma.

**Tabla 4: Resultado de caso de validación, arrecife plataforma (alturas de ola corresponden a altura significativa).**

Caso	Costa et al. (2015)			IH2VOF		
	Hs <sub>i</sub> [m]	Hs <sub>t</sub> [m]	K <sub>t</sub>	Hs <sub>i</sub> [m]	Hs <sub>t</sub> [m]	K <sub>t</sub>
<b>E1A_tormenta</b>	0.82 - 2.11	0.39 - 0.90	0.33 - 0.59	2.08	1.25	0.60

Mediante visualización de las series de superficie libre en los puntos inicial y de control (Figura 24) se aprecia la disminución en la amplitud de forma notoria. Esto se traduce en una atenuación significativa de la serie temporal de altura de ola, con valores iniciales que pueden alcanzar los 4.0 [m], mientras que en el punto de control no se superan los 2.0 [m].

Por otra parte, se identifica un aumento a lo largo de la serie temporal de periodos de ola, con valores significativos iniciales en torno a los 10 [s], para superar los 12 [s] en el punto de control. Esto se produce principalmente en la interacción entre el oleaje incidente y la cresta del arrecife, en el cual las olas de menor periodo rompen, disipando gran parte de su energía, mientras que las olas de mayor periodo se ven menos afectadas por este proceso y continúan su propagación a lo largo del perfil. Además, este aumento de periodo produce una disminución del número de olas en el punto de control.

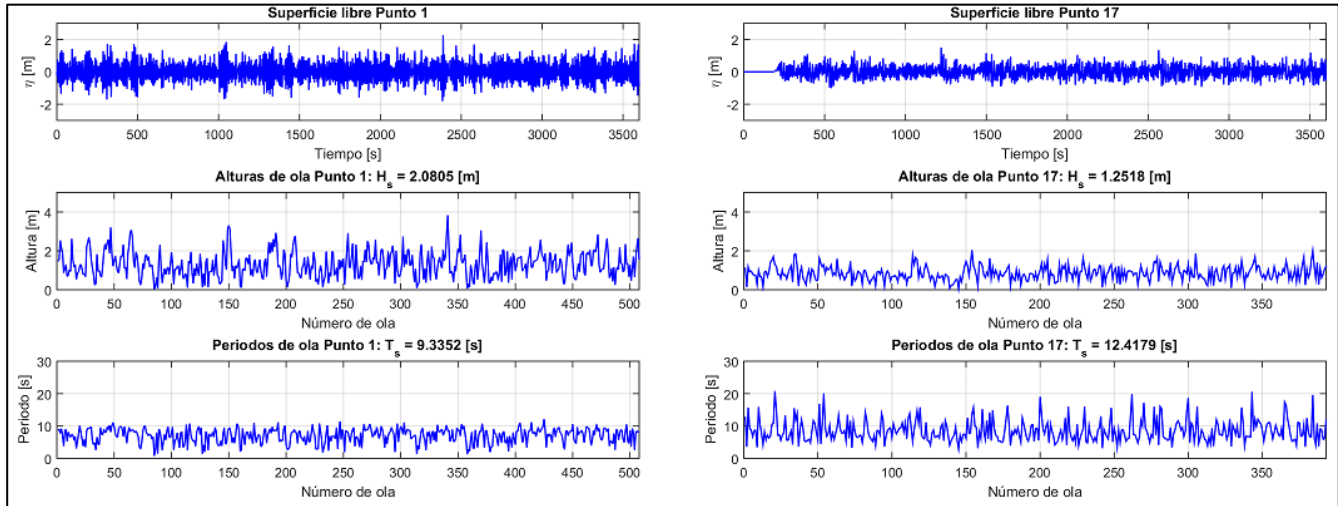


Figura 24: Serie de superficie libre, alturas de ola y periodos de ola en estaciones inicial y de control, caso validación E1A\_tormenta (arrecife plataforma).

Las alturas y periodos significativos de ola en cada uno de los puntos de control (Figura 25) permiten analizar la transferencia de oleaje a lo largo de todo el perfil. Se aprecia que el oleaje al interactuar con la cresta del arrecife disminuye su altura significativa, lo cual continúa ocurriendo a lo largo de todo el perfil hasta alcanzar su valor mínimo al llegar a la laguna detrás del arrecife, sector donde se ubica el punto de control de altura de ola transmitida. Para el periodo significativo se logra identificar que este comienza a aumentar una vez que se produce la rotura de olas de menor periodo en la interacción con la cresta, pasando de un valor inicial de 9.3 [s] hasta un valor entre 12 y 13 [s].

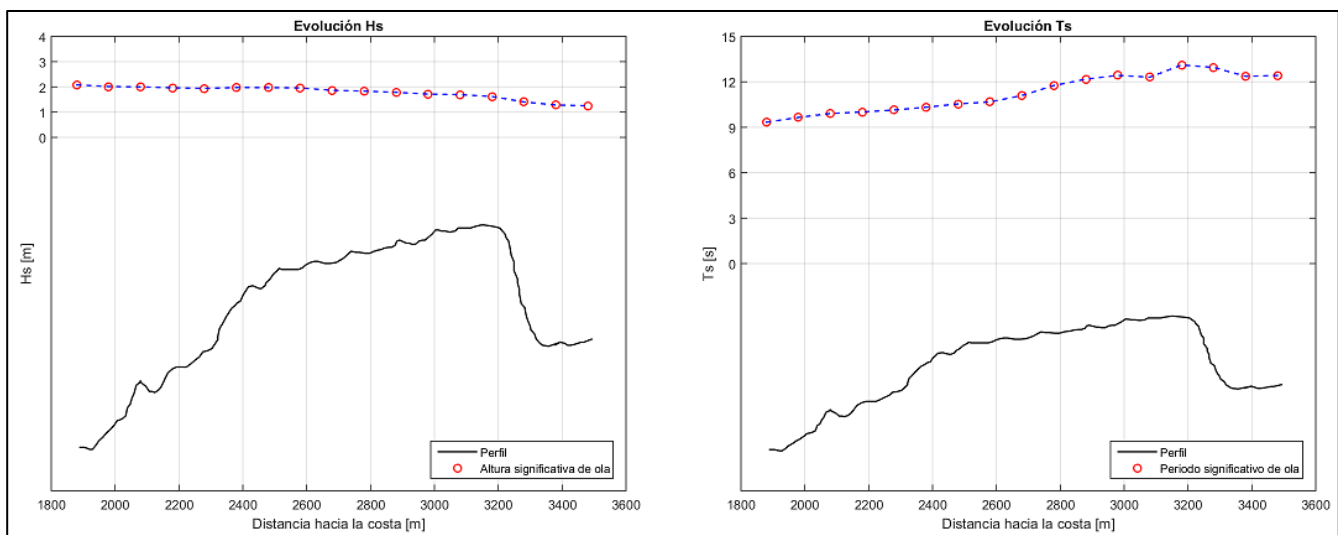


Figura 25: Evolución de parámetros de oleaje a lo largo de arrecife plataforma. Izquierda: altura significativa ( $H_s$ ); derecha: periodo significativo ( $T_s$ ).

### 3.4.2 VALIDACIÓN ARRECIFE FRANJA

Los resultados de validación de los casos simulados para arrecife tipo franja se presentan en la Tabla 5, tanto para oleaje medio (E2B\_medio) como para oleaje de tormenta (E2B\_tormenta). Cabe destacar que para la condición media es posible comparar valores exactos, ya que se dispone de esta información en Costa et al. (2015).

Para las dos condiciones de oleaje simuladas se ha obtenido una buena representación por parte del modelo IH2VOF, lo que queda en evidencia principalmente para el resultado del coeficiente de transmisión de condición media, con una atenuación de la altura de ola de 90%. Para la condición de tormenta se obtienen resultados de  $K_t$  dentro el intervalo establecido, mostrando una disminución de la altura de ola significativa en un 80%. Es importante señalar que el coeficiente de transmisión es menor en condición media principalmente a que es un caso ejecutado con menor nivel de marea, lo cual condiciona la altura de ola transmitida, aspecto que se profundiza en capítulo 5.

**Tabla 5: Resultados casos de validación, arrecife franja (alturas de ola corresponden a altura significativa).**

Caso	Costa et al. (2015)			IH2VOF		
	$H_{si}$ [m]	$H_{st}$ [m]	$K_t$	$H_{si}$ [m]	$H_{st}$ [m]	$K_t$
<b>E2B_medio</b>	1.87	0.23	0.12	1.89	0.18	0.10
<b>E2B_extremo</b>	1.16 - 2.69	0.06 - 0.51	0.04 - 0.28	2.74	0.55	0.20

Las series de superficie libre y de alturas de ola para las condiciones ejecutadas en arrecife franja (Figuras 26 y 27) reflejan los porcentajes de atenuación de oleaje indicados anteriormente, lo cual resulta ser más significativo en comparación a los resultados obtenidos en arrecife plataforma. Se aprecia que en el punto de control las olas ya han sufrido procesos de transformación, con alturas de ola que no superan 1.0 [m] en condición de tormenta.

En el caso de las series temporales de periodos, se identifica un notorio aumento de este parámetro en el punto de control, superando los 100 [s] en ambas condiciones ejecutadas. Esto marca la primera diferencia entre las dos tipologías de arrecife de coral en estudio, obteniendo que para el arrecife tipo franja la liberación de onda infragravitatoria tiene mayor relevancia en comparación al arrecife plataforma.

Las alturas y periodos significativos a lo largo de los puntos de control (Figuras 28 y 29) muestran que una vez que las olas se encuentran con la cresta del arrecife, sufren un leve proceso de asomeramiento para luego romper, lo cual queda en evidencia con la repentina disminución de la altura de ola. Una vez que esto ocurre, comienza un aumento gradual de los periodos significativos, los cuales superan los 80 [s] en los últimos puntos de control. Por lo tanto, se deduce que una vez que las olas rompen, la energía de periodos cortos se transfiere hacia las componentes de baja frecuencia (periodos largos), obteniendo los resultados expuestos.

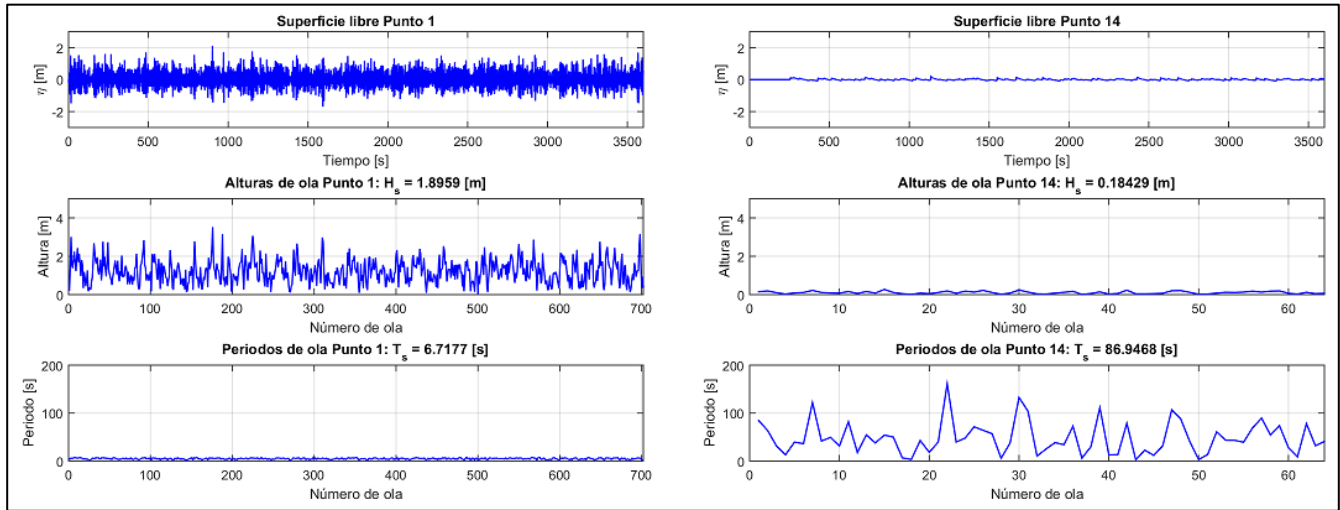


Figura 26: Serie de superficie libre, alturas de ola y periodos de ola en estaciones inicial y de control, caso validación E2B\_medio (arrecife franja).

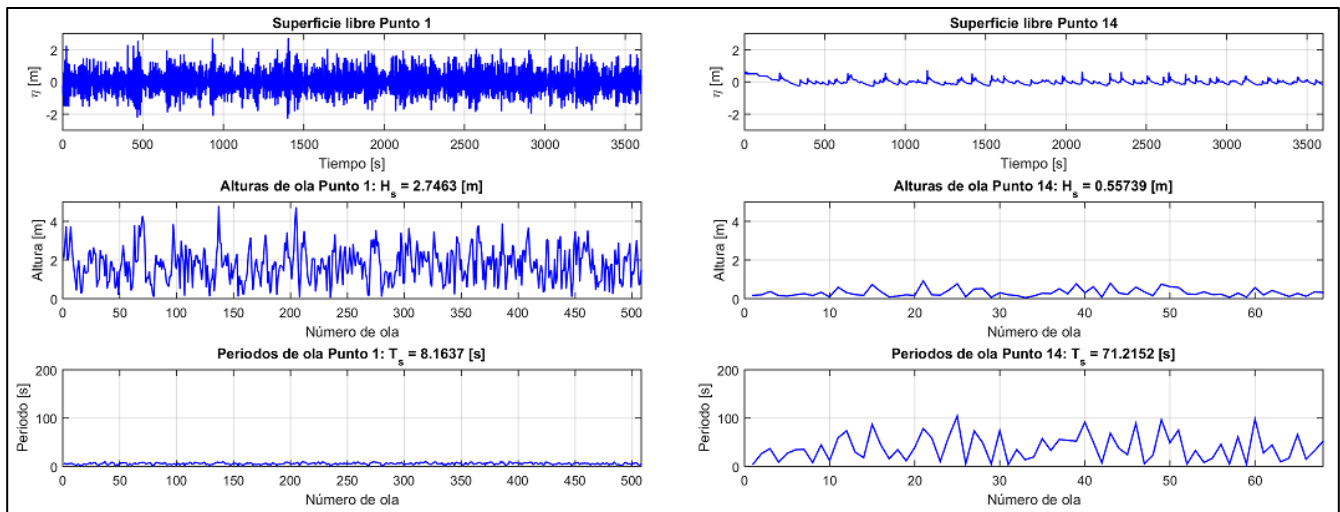


Figura 27: Serie de superficie libre, alturas de ola y periodos de ola en estaciones inicial y de control, caso validación E2B\_tormenta (arrecife franja).

En comparación al arrecife plataforma, el proceso mencionado tiene mayor relevancia en el arrecife tipo franja ya que la elevación de este es mayor, lo que deja una menor disponibilidad de columna de agua para que el oleaje pueda propagarse. Finalmente, esto provoca que el oleaje rompa por completo en el arrecife franja, disipando la energía de olas de corto periodo.

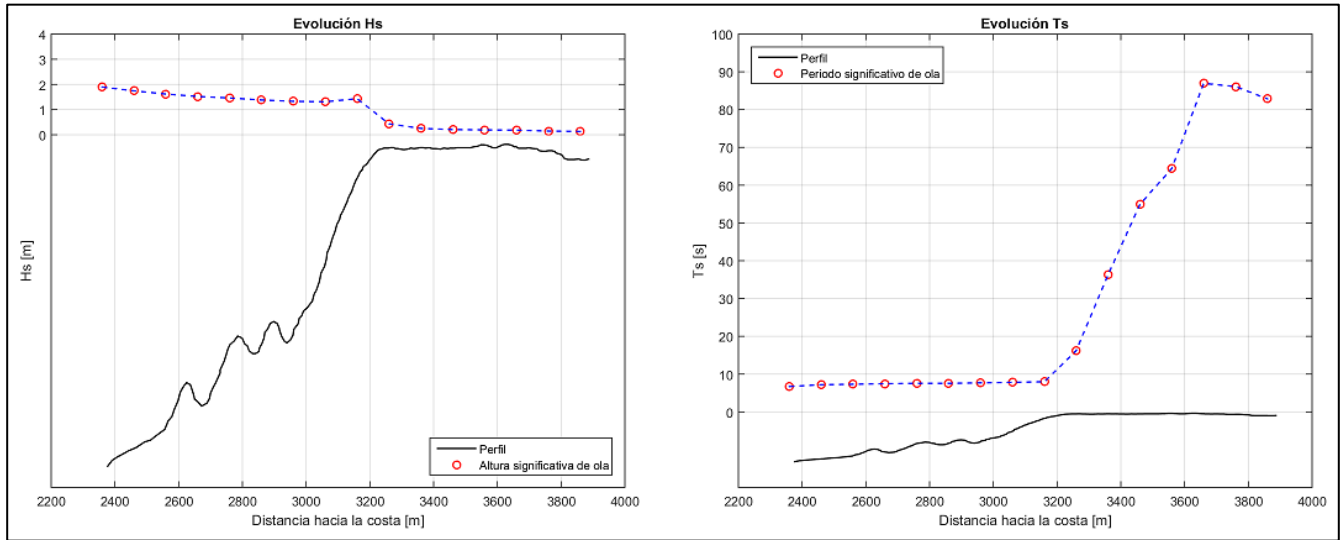


Figura 28: Evolución de parámetros de oleaje a lo largo de arrecife franja, caso E2B\_medio. Izquierda: altura significativa ( $H_s$ ); derecha: periodo significativo ( $T_s$ ).

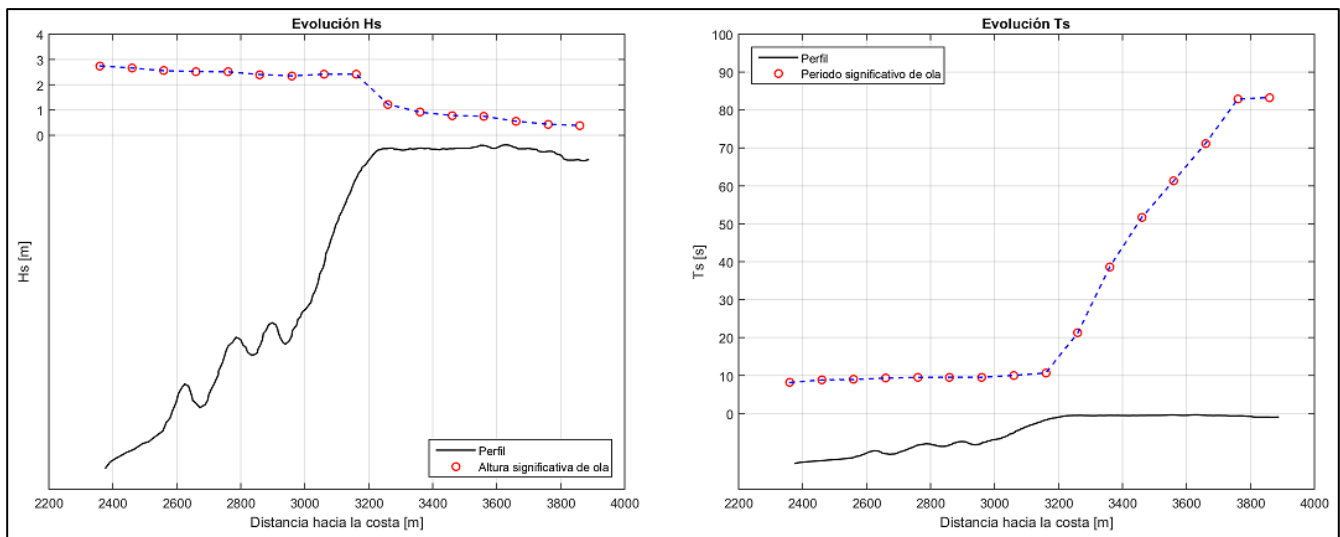
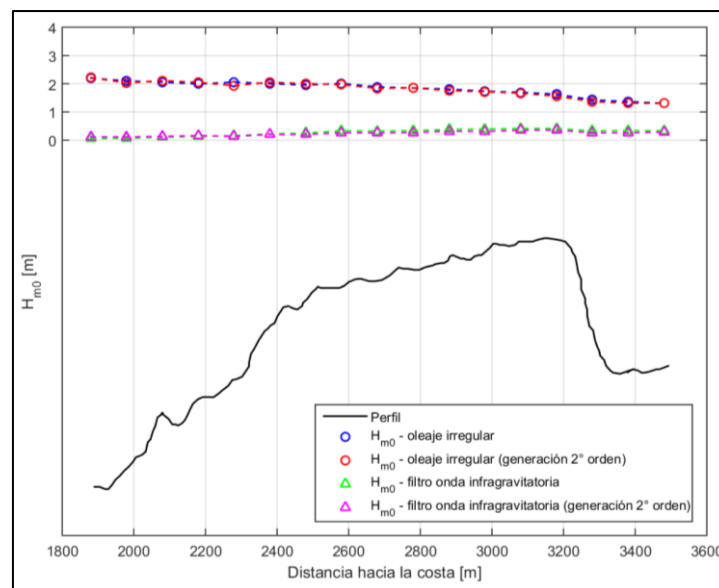


Figura 29: Evolución de parámetros de oleaje a lo largo de arrecife franja, caso E2B\_tormenta. Izquierda: altura significativa ( $H_s$ ); derecha: periodo significativo ( $T_s$ ).

### 3.4.3 INFLUENCIA DE GENERACIÓN DE OLAJE CON COMPONENTE DE SEGUNDO ORDEN

Analizando las alturas de ola significativas espectrales en cada uno de los puntos de control del arrecife plataforma (Figura 30), se identifica que el oleaje generado con segundo orden no logra alcanzar mayor relevancia en comparación al oleaje generado sin esta componente, lo que queda reflejado con la obtención de un  $K_t$  de 0.60 en ambos casos. Sin embargo, se aprecia que una vez que el oleaje interactúa con la cresta del arrecife, la altura de ola de onda infragravitatoria comienza a aumentar su valor gradualmente, pero vuelve a disminuir una vez que la onda llega a la laguna en la parte posterior del arrecife.

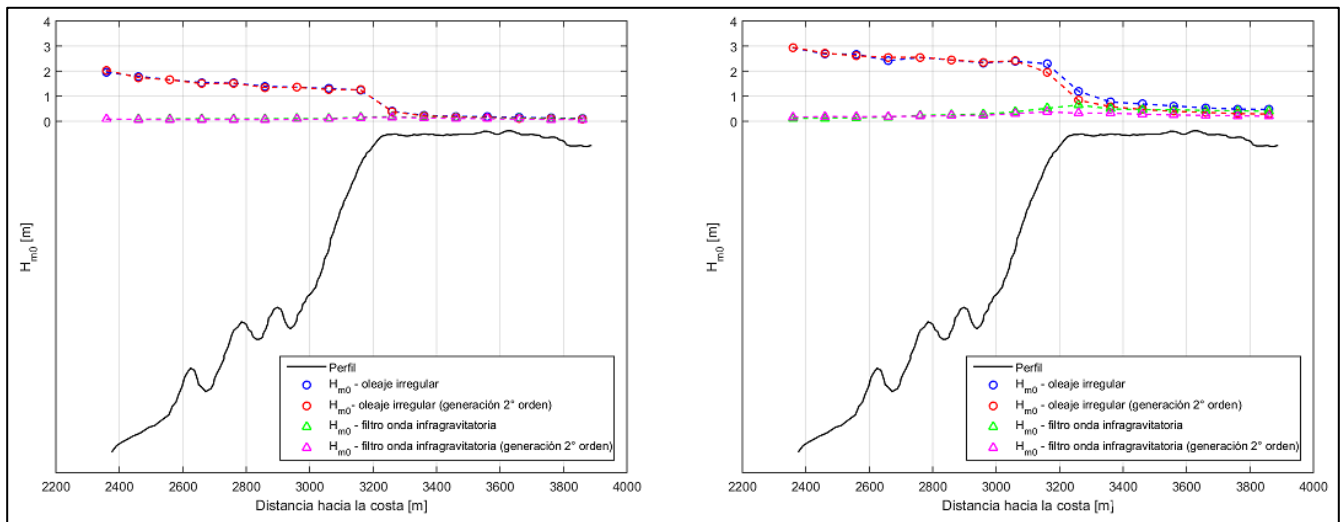


**Figura 30: Comparación de evolución de  $H_{m0}$  a lo largo de arrecife plataforma con diferentes métodos de generación de oleaje.**

En cuanto a las alturas de ola significativas espectrales en los puntos de control del arrecife tipo franja (Figura 31), se obtiene que una vez el oleaje interactúa con la cresta del arrecife el aporte de onda infragravitatoria es muy relevante en el cálculo de este parámetro, debido a que las olas de corto periodo rompen prácticamente por completo. Dicho de otra forma, la altura de ola que llega hasta el punto de control corresponde en gran medida a onda infragravitatoria, lo cual es más notorio para condición de oleaje medio.



En cuanto a los valores de  $H_{m0}$  del oleaje irregular generado con componente de segundo orden, para la condición media en arrecife franja no se aprecian cambios significativos en comparación al oleaje generado sin esta componente, obteniendo valores de  $K_t$  de 0.08 y 0.1 respectivamente. En el caso del oleaje de tormenta se identifican diferencias una vez que el oleaje interactúa con la cresta del arrecife, con una mayor atenuación de la altura de ola para el oleaje generado con componente de segundo orden, lo que se traduce en un coeficiente de transmisión de 0.12, el cual es menor al expuesto en los resultados de la Tabla 5.



**Figura 31: Comparación de evolución de  $H_s$  a lo largo de arrecife franja con diferentes métodos de generación de oleaje. Izquierda: caso E2B\_medio; derecha: caso E2B\_tormenta.**

Con los resultados expuestos, se considera que la componente de segundo orden no tiene una influencia significativa en la evaluación de coeficientes de transmisión en los entornos de coral considerados. Por lo tanto, y debido al mayor tiempo computacional asociado a la generación y simulación de oleajes de segundo orden, en el análisis del coeficiente de transmisión realizado en el capítulo 5, el oleaje irregular es generado sin componente de segundo orden.

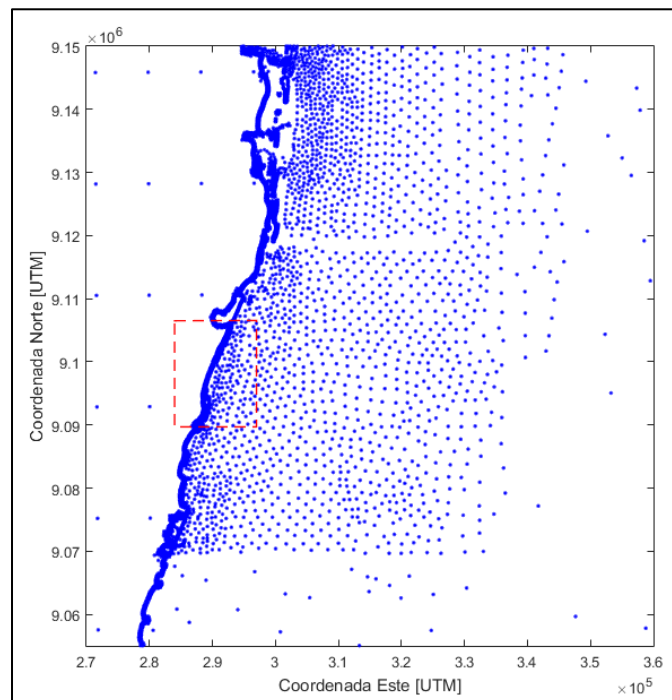
## 4 PROPAGACIÓN DE ESTADOS DE MAR

Luego de verificar el desempeño del modelo IH2VOF en la representación de la transferencia de oleaje, se ha procedido a realizar la propagación de estados de mar de interés frente a los perfiles de arrecife de coral en estudio, cuyos resultados serán las condiciones iniciales para ejecutar nuevamente el modelo IH2VOF y así analizar el coeficiente de transmisión.

En el presente capítulo se expone la información batimétrica disponible, descripción de clima marítimo, consideraciones numéricas y los resultados del proceso de propagación. Cabe destacar que la propagación de oleaje se ha realizado utilizando el software IHPropaga, cuya descripción se adjunta en Anejo 9.2.

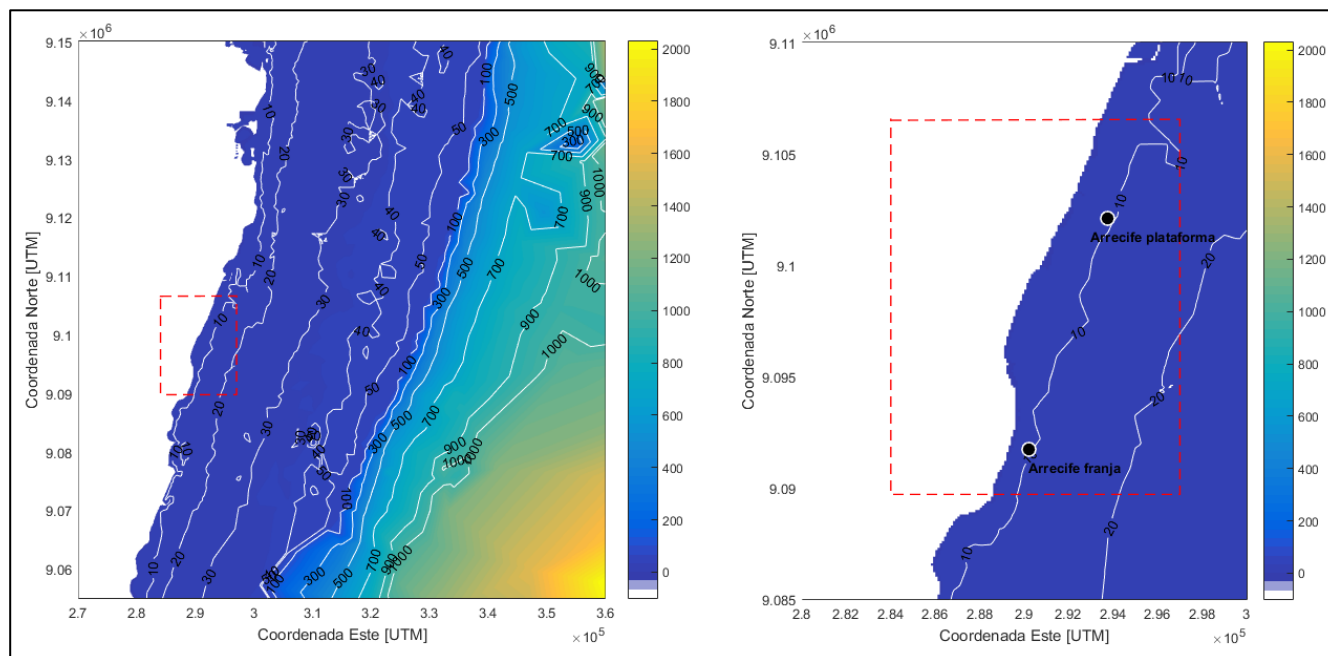
### 4.1 INFORMACIÓN BATIMÉTRICA DISPONIBLE

Los puntos batimétricos disponibles en la zona de Recife se muestran en la Figura 32, en la cual se ha marcado con línea roja punteada el área en la cual se encuentra el arrecife de coral. Esta información ha sido procesada, generando la superficie batimétrica de la Figura 33, en la que se han marcado los puntos de propagación frente a cada uno de los perfiles de arrecife de coral. Estos puntos se han ubicado en base a la información expuesta en el capítulo 2 (Figura 19) y a las estaciones iniciales mostradas en capítulo 3.1.1 (Figura 20), con coordenadas que se especifican en capítulo 4.3.



**Figura 32: Puntos batimétricos disponibles, Recife (Brasil).**

Además de la superficie batimétrica generada, se han representado los veriles, los cuales se presentan paralelos a la línea de costa, con información disponible por sobre los 1000 [m] de profundidad. Por último, destacar que no existen mayores obstáculos hacia los puntos de propagación y que no se identifican accidentes batimétricos importantes que provoquen algún tipo de transformación significativa en el oleaje.



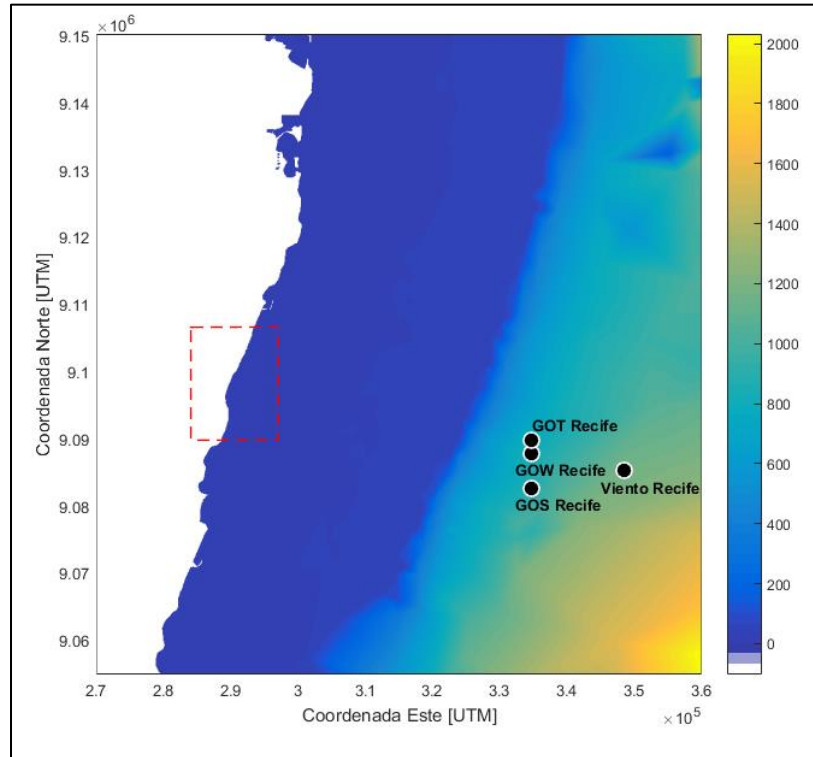
**Figura 33: Superficie batimétrica. Izquierda: vista general; derecha: vista zona de estudio.**

## 4.2 CLIMA MARÍTIMO

En la Figura 34 se muestra la referencia geográfica de las bases de datos de oleaje en profundidades indefinidas (GOW), mareas astronómicas (GOT) y meteorológica (GOS) y viento. Adicionalmente, en la Tabla 6 se especifican las ubicaciones geográficas, profundidad o elevación y extensión temporal de cada base de datos disponible en la zona de estudio.

**Tabla 6: Información general de bases de datos de clima marítimo.**

Base de datos	Ubicación geográfica (UTM)	Profundidad /elevación	Extensión temporal
<b>GOW</b>	334784 [m] E; 9087753 [m] N	819 [m]	01/01/1979 – 29/02/2020
<b>GOT</b>	334778 [m] E; 9089600 [m] N	802.7 [m]	01/01/1900 – 01/01/2150
<b>GOS</b>	334804 [m] E; 9082544 [m] N	No especificado	01/01/1948 – 31/12/2008
<b>Viento</b>	348565 [m] E; 9085138 [m] N	No especificado	01/01/1979 – 29/02/2020



**Figura 34: Superficie batimétrica y ubicación de bases de datos de clima marítimo.**

De forma complementaria a la información expuesta en Tabla 6, en la Figura 35 se presentan las series de datos de parámetros de oleaje (altura significativa y periodo pico), niveles de marea astronómica y meteorológica y velocidad del viento. Se aprecia que para oleaje y viento se posee información para un mismo periodo de tiempo, además de una serie de marea astronómica de larga extensión.

La base de datos de marea meteorológica se extiende hasta el año 2008, sin coincidir por completo con la información de oleaje. Tal como se expone en el capítulo 4.2.1, no corresponde a una variable que posea gran implicancia en el clima marítimo de la zona de estudio, como sí lo son el oleaje, marea astronómica y el viento. Debido a esto, y con motivo de poder conformar una base de datos que incluya información de oleaje actualizada, se ha decidido no considerar la influencia de la marea meteorológica en las propagaciones de estados de mar a realizar.

Con esto, se obtiene una base de datos de clima marítimo con información de oleaje, marea astronómica y viento, con resolución temporal horaria que se extiende entre 01 de enero de 1979 hasta 29 de febrero de 2020.

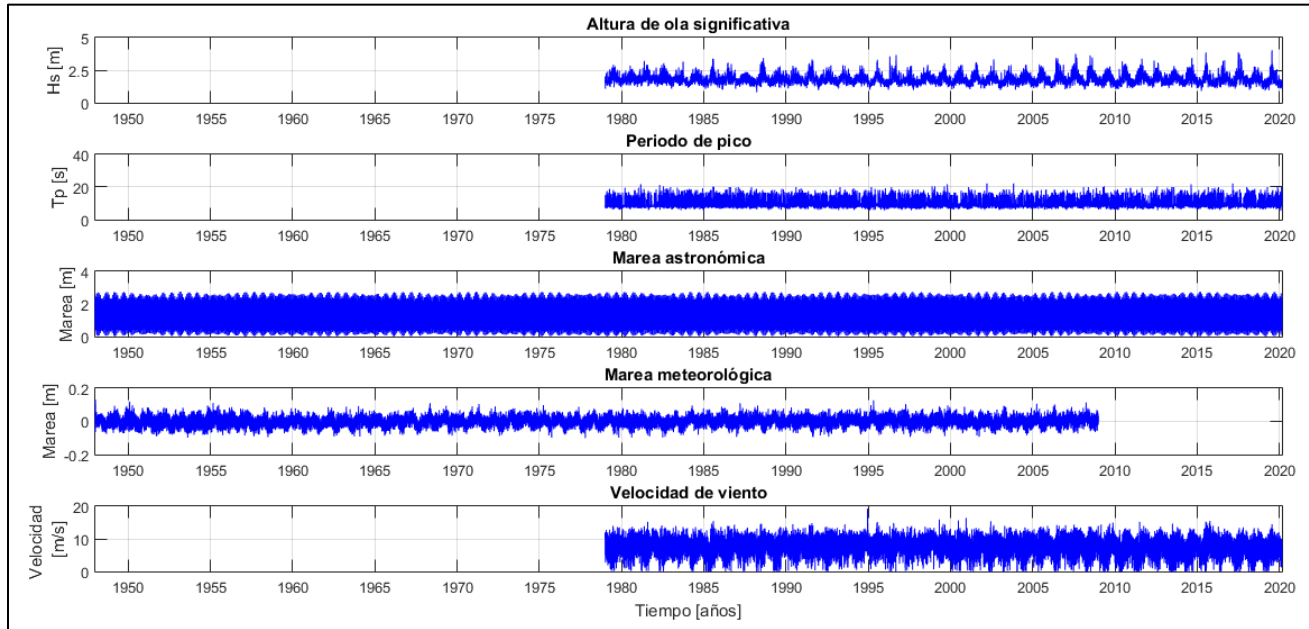


Figura 35: Series de temporales de bases de datos de oleaje ( $H_s$  y  $T_p$ ), mareas y viento (velocidad).

#### 4.2.1 NIVEL DEL MAR

En la Figura 36 se muestra la serie de marea astronómica del mes de enero del año 2020, lo que permite identificar que en la zona de estudio esta variable no supera un nivel de 2.5 [m], con ocurrencia mensual de dos mareas vivas (sicigia) y dos mareas muertas (cuadratura).

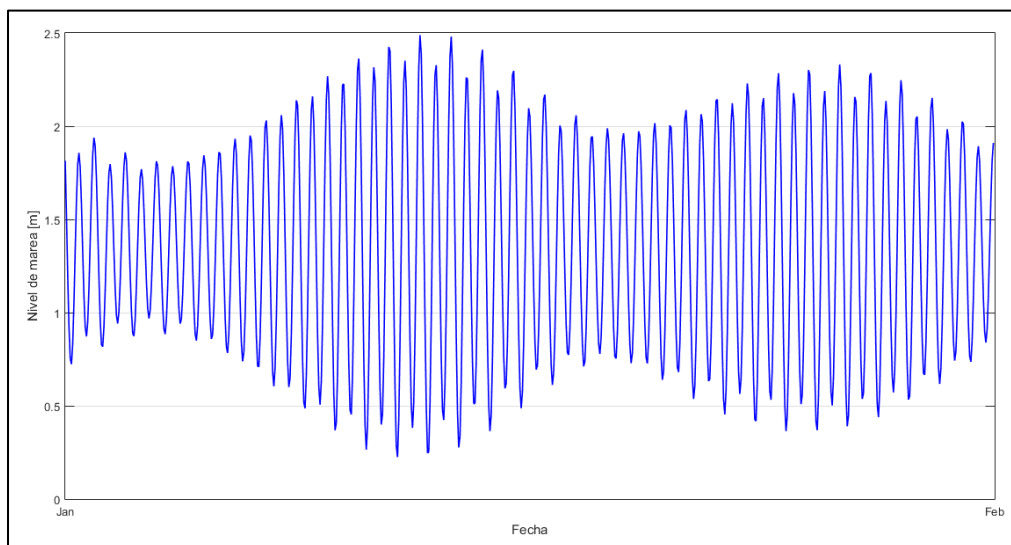


Figura 36: Serie de marea astronómica, enero 2020.

Aplicando un análisis armónico de marea por medio de la herramienta T-Tide (Pawlowicz et al., 2002), se logran identificar las principales constituyentes de marea astronómica, resultado que se expone en la Figura 37. Se aprecia que las mayores amplitudes de las constituyentes significativas provienen de M2, S2, N2, K1 y O1. Precisamente, para caracterizar el régimen de marea existente en una zona de interés, se utilizan las amplitudes de las constituyentes diurnas (K1 y O1) y semidiurnas (M2 y S2) aplicando el coeficiente de Courtier, de la forma:

$$R = \frac{(K1) + (O1)}{(M2) + (S2)}$$

Donde el régimen de marea queda establecido por:

$$\begin{aligned} R &\leq 0,25 \text{ Semidiurno} \\ 0,25 &\leq R \leq 1,5 \text{ Mixto} \\ 1,5 &< R \text{ Diurno} \end{aligned}$$

Para la zona de Recife se obtiene un coeficiente de Courtier de 0.110, por lo que la marea corresponde poseer un régimen semidiurno. Esto queda reflejado de forma gráfica en la Figura 38, la cual muestra una serie de dos días de marea astronómica elegida de forma aleatoria, con la ocurrencia de dos pleamares y dos bajamares diarias, comportamiento característico del régimen semidiurno.

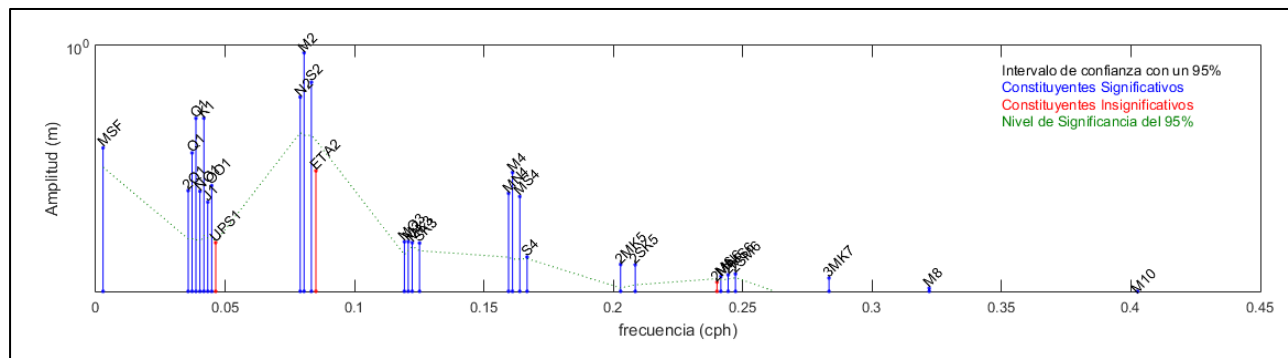


Figura 37: Resultado análisis armónico de marea astronómica.

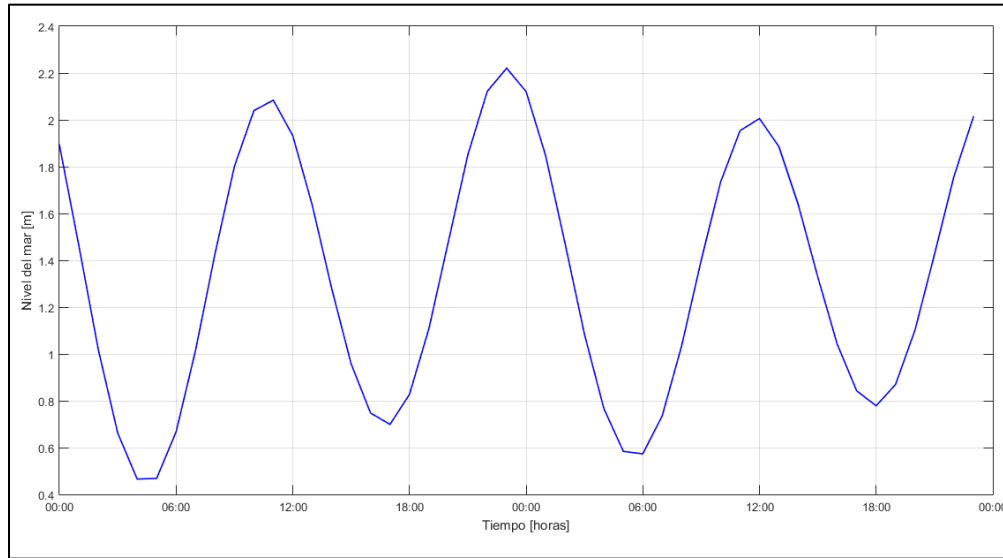


Figura 38: Marea astronómica semidiurna, Recife.

Adicionalmente, se han determinado los máximos mensuales de la componente astronómica, cuya función de distribución se presenta en la Figura 39. Mediante la determinación del percentil de 50% (valor medio) de dicha función es posible establecer que el rango de marea en Recife es de 2.42 [m] aproximadamente.

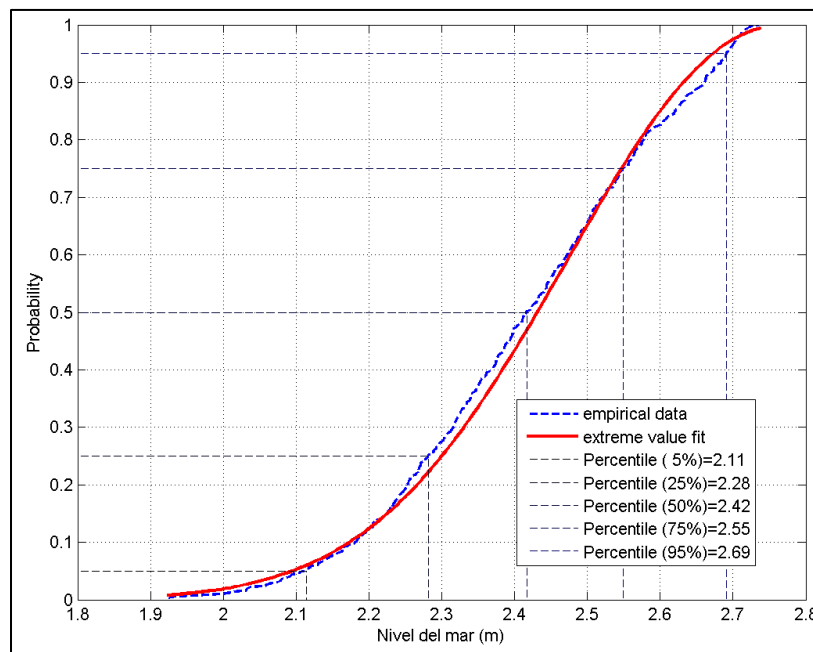
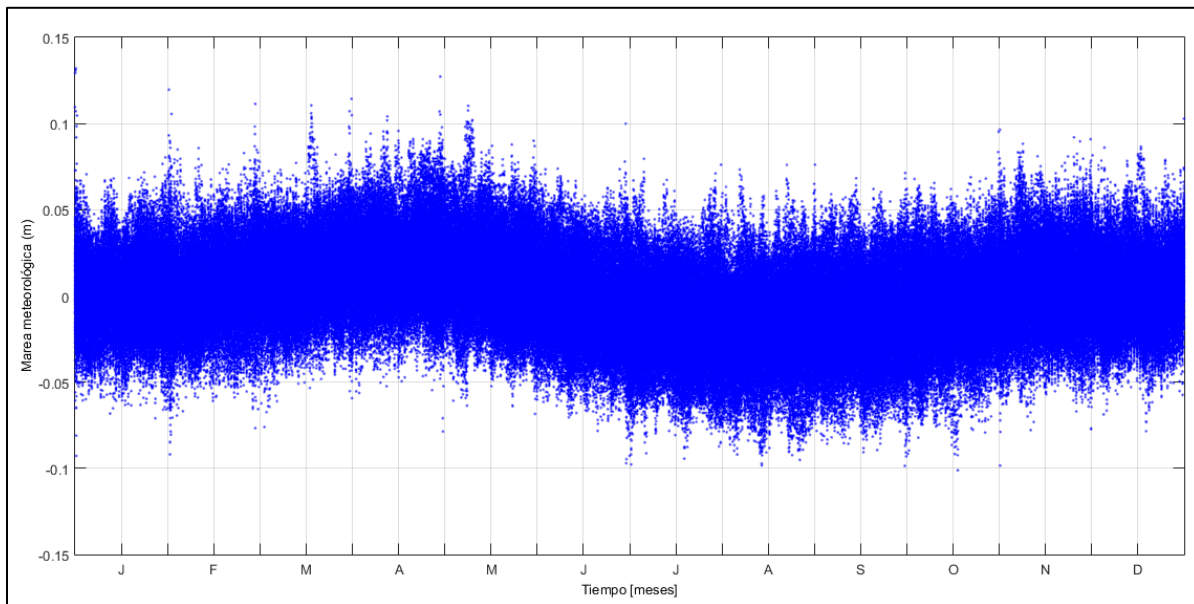


Figura 39: Función de distribución de máximos mensuales de marea astronómica.



En cuanto a la componente meteorológica de marea, en la Figura 40 se muestra la variación mensual de dicha variable, con un aporte máximo cercano a 0.15 [m] entre los meses de marzo y mayo. Comparando este valor con las amplitudes de marea astronómica, se considera que la componente meteorológica no tiene un aporte significativo en el nivel del mar en Recife. Con esto, sumado a que además la información de marea meteorológica se extiende sólo hasta el año 2008 (Figura 35), se considera sólo marea astronómica en los estados de mar a propagar desde profundidades indefinidas.



**Figura 40: Variación de marea meteorológica de forma mensual.**

#### **4.2.2 OLEAJE – CLIMA MEDIO**

A modo de resumen, en la Tabla 7 se presentan valores estadísticos de altura significativa ( $H_s$ ) y periodo pico ( $T_p$ ). Se aprecia que para  $H_s$  el valor mínimo es inferior a 1.0 [m], mientras que el máximo alcanza 4.03 [m], con una media de 1.78 [m]. Para el periodo pico se obtienen un mínimo en torno a 5.0 [s] y un máximo de 22.2 [s].

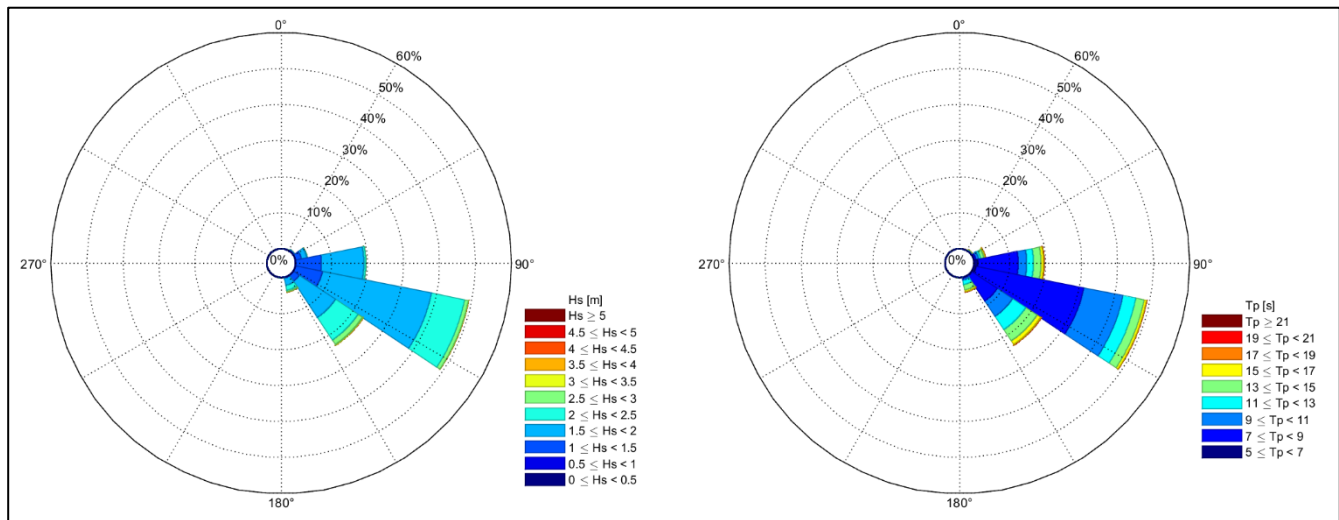
**Tabla 7: Estadísticos de resumen parámetros de oleaje en profundidades indefinidas.**

Parámetro	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
$H_s$ [m]	1.78	4.03	0.81	0.33
$T_p$ [s]	9.83	22.2	5.43	2.47

Los resultados de la caracterización direccional del clima medio de oleaje en profundidades indefinidas son representados mediante rosas de oleaje para los parámetros de altura significativa, periodo pico y dirección, tal como se muestra en la Figura 41<sup>5</sup>.

Se aprecia que la condición reinante proviene desde el ESE, específicamente en un rango de direcciones entre 107° y 123°, con 37.2% del total de datos. También se identifica un aporte importante desde dos rangos direccionales, el primero entre 91° y 107° con 29.9% de la estadística y el segundo entre 123° y 139° con ocurrencia de 20.8%. Para los rangos direccionales mencionados, las condiciones de oleaje se presentan en mayor frecuencia con altura de ola significativa entre 1.5 y 2.0 [m] (58.6%) y periodo pico entre 7.0 y 9.0 [s] (42.3%), lo cual es representado en el gráfico de dispersión entre  $H_s$  y  $T_p$  de la Figura 42.

En cuanto a las condiciones dominantes, se obtiene que estas inciden principalmente desde direcciones entre 100° y 160°, con periodos de pico que pueden alcanzar los 18 [s] y altura significativa que ha superado los 4.0 [m].



**Figura 41: Rosas de oleaje de altura significativa ( $H_s$ ) y periodo de pico ( $T_p$ ) en profundidades indefinidas.**

<sup>5</sup> En Anejo 9.3 se adjuntan tablas de incidencia (probabilidad conjunta de las combinaciones de parámetros de oleaje).

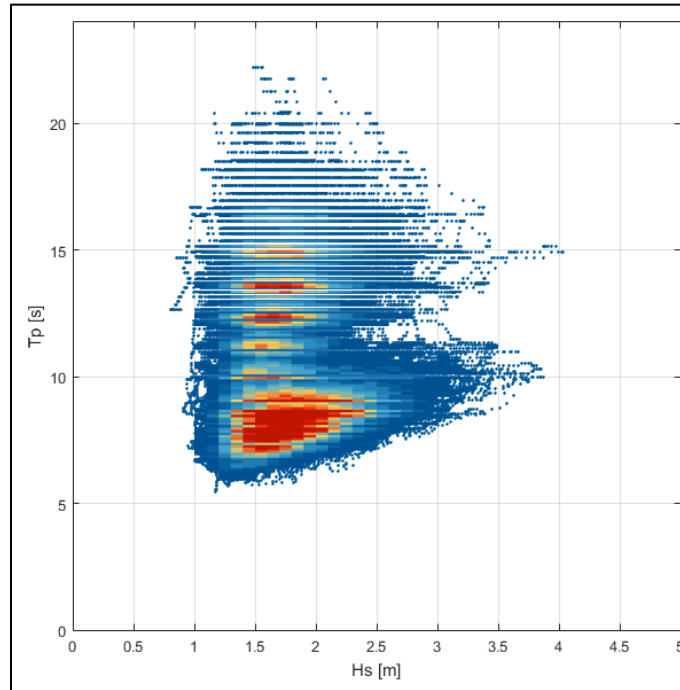


Figura 42: Dispersión  $H_s$  y  $T_p$  en profundidades indefinidas.

En la Figura 43 se exponen las funciones de densidad de probabilidad para  $H_s$  y  $T_p$ , parámetros para los cuales las mejores funciones de ajuste corresponden a valor extremo. De esta forma es posible comprobar que, tal como se ha indicado anteriormente, durante la mayor parte del tiempo la altura de oleaje no supera 2.0 [m], concentrándose principalmente en torno a 1.7 [m]. Por otra parte, los periodos pico presentan su mayor densidad de probabilidad en torno a 8.0 [s].

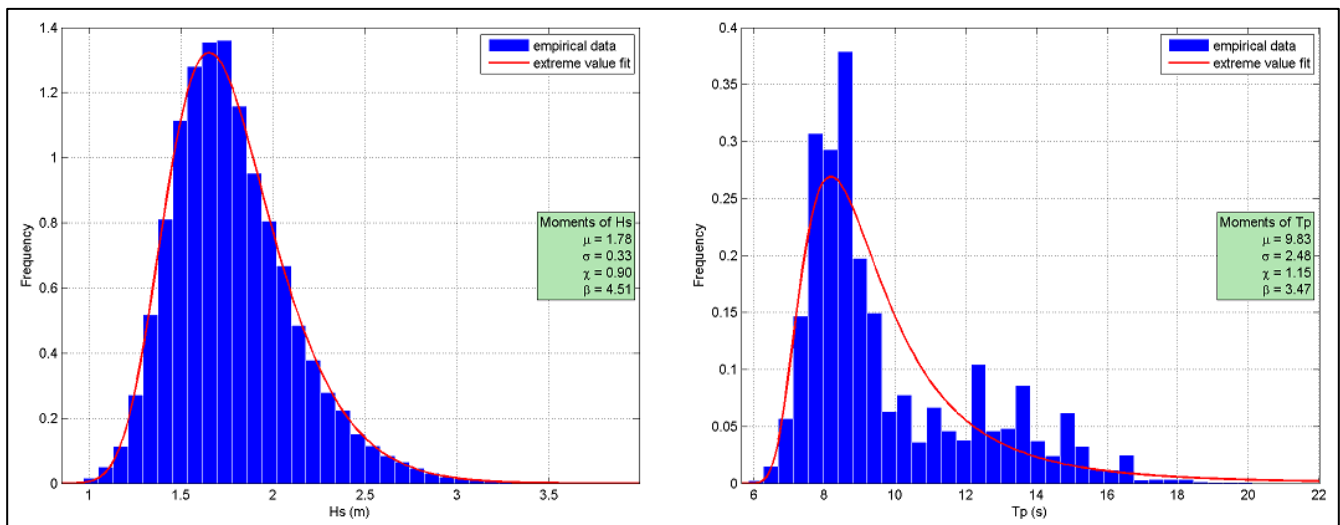
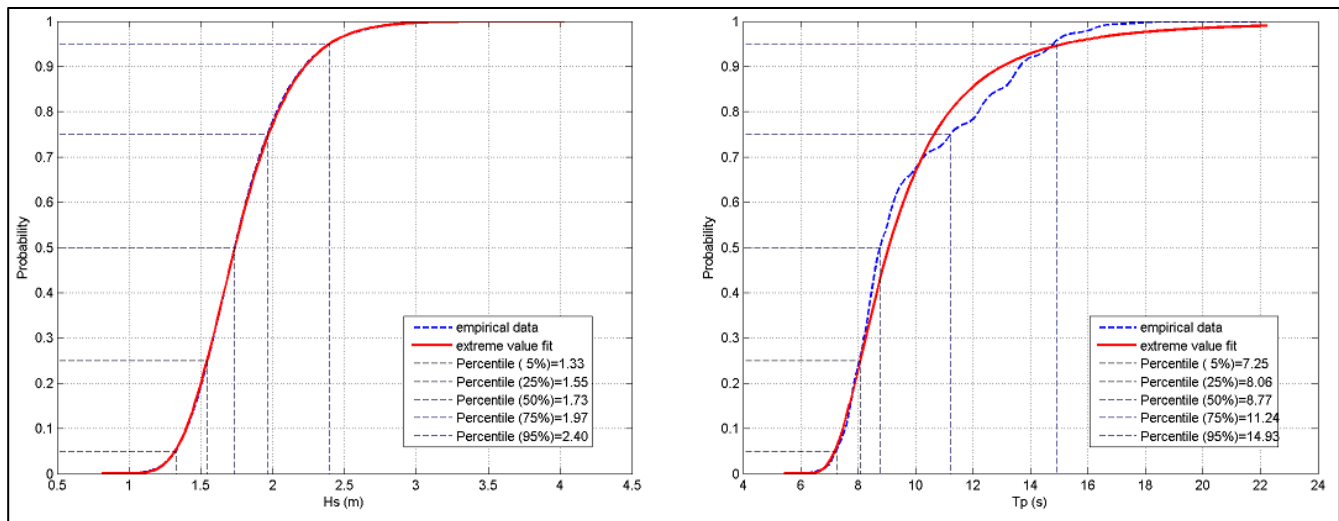


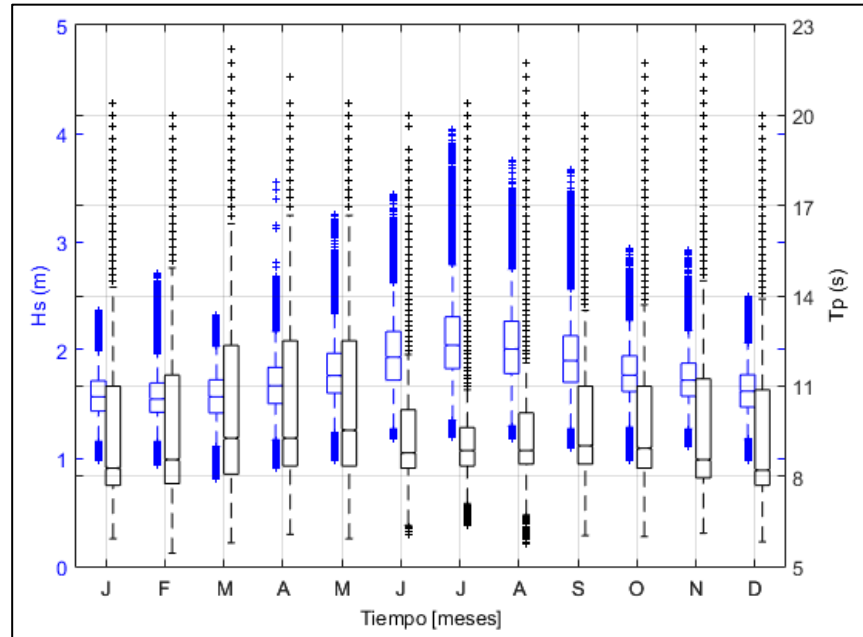
Figura 43: Función de densidad. Izquierda: altura significativa; derecha: periodo pico.

Las funciones de distribución acumulada (Figura 44) muestran que, a pesar de que el oleaje en condiciones medias presenta  $H_s$  menor a 2.0 [m] (1.73 [m] para el percentil de 50%), sobre el percentil de 95% se presentan valores de  $H_s$  de 2.4 [m]. En el caso de periodos pico, el percentil de 50% se encuentra en torno a 8.7 [s], mientras que el percentil de 95% es cercano a 15 [s].



**Figura 44:** Función de distribución. Izquierda: altura significativa; derecha: periodo pico.

Mediante el diagrama de cajas que se expone en la Figura 45 es posible identificar que existe un cierto grado de estacionalidad de  $H_s$  y  $T_p$  del oleaje en profundidades indefinidas, con una disminución en los valores de dichos parámetros en época estival. Durante invierno (junio, julio y agosto) los valores medios de altura significativa superan los 2.0 [m], con valores máximos que pueden alcanzar cerca de 4.0 [m]. Para los periodos pico el comportamiento es contrario en invierno, época en la cual se aprecia una disminución de los valores medios de esta variable, pero con valores máximos que superan los 20 [s].



**Figura 45: Diagrama de cajas de  $H_s$  y  $T_p$  mensual.**

#### 4.2.3 OLEAJE – CLIMA EXTREMO

Para la estimación del clima extremo de altura significativa de ola significativa se ha considerado el método de episodios sobre un umbral (POT, por sus siglas en inglés), con un valor de  $H_s$  de 2.4 [m], lo cual garantiza la selección de un mínimo de 10 episodios por año. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 46, en la cual se aprecia que para un periodo de retorno de 2 años se supera un valor de 3.0 [m], mientras que para un periodo de retorno superior a 50 años el valor de  $H_s$  se encuentra sobre 4.0 [m].

Considerando los resultados obtenidos con el método de umbral sobre 2.4 [m], se ha procedido a determinar la relación que existe entre dicha condición y el periodo de pico y la dirección. Como se puede apreciar en la Figura 47, se han realizado análisis a la dispersión existente entre  $H_s$ - $T_p$  y  $H_s$ -Dir para las condiciones de altura significativa mínima de 2.4 [m], lo cual ha sido destacado con puntos de color rojo. Con esto se obtiene que estas condiciones de oleaje se presentan para periodos pico sobre 7.0 [s]. En el caso de las direcciones, se identifica que las direcciones desde las cuales inciden los oleajes más intensos corresponden a aquellas entre  $100^\circ$  y  $160^\circ$ , lo cual corrobora lo expuesto al inicio de la sección 4.2.2. Sin embargo, existen casos en los cuales alturas de ola sobre el umbral establecido se encuentran fuera del rango direccional mencionado.

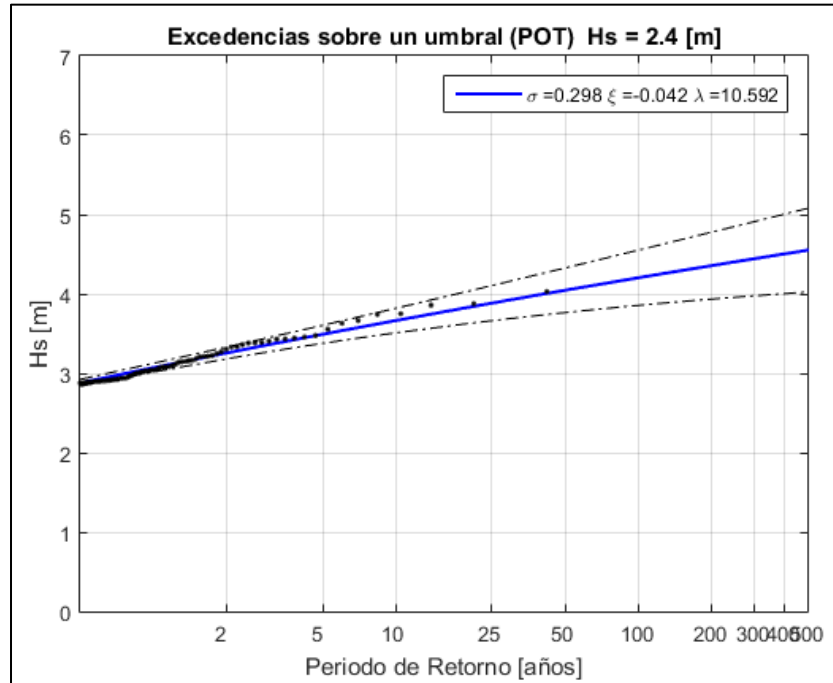


Figura 46: Resultados clima extremo de oleaje para  $H_s$ .

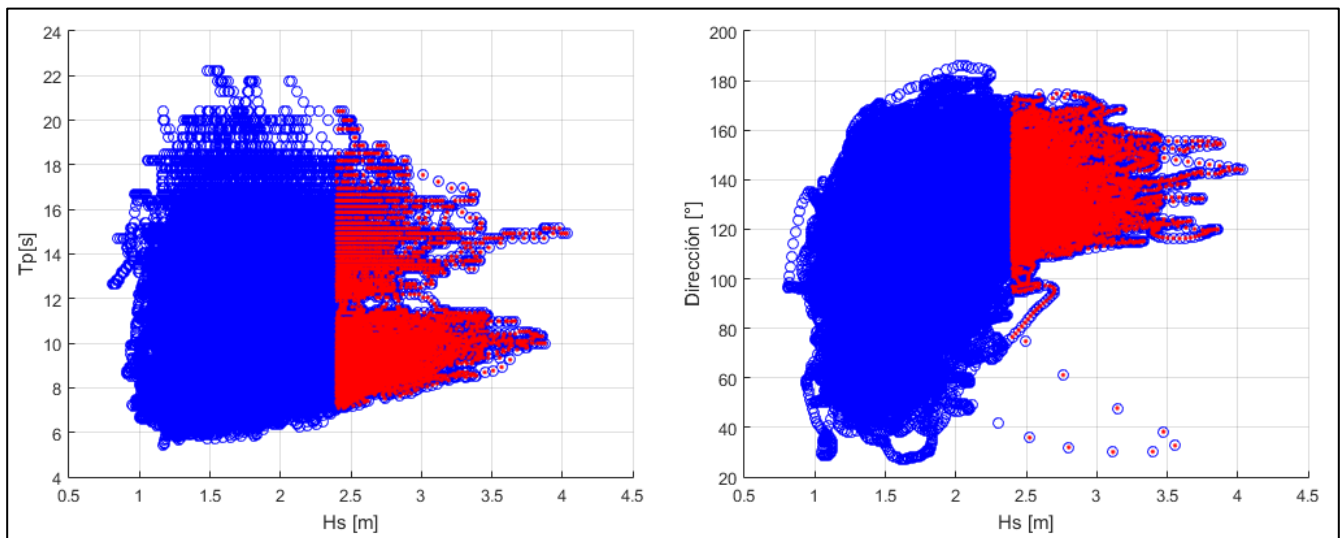


Figura 47: Dispersión  $H_s$ - $T_p$  y  $H_s$ -Dir para oleaje sobre 2.4 [m] de altura significativa.

#### 4.2.4 VIENTO

La rosa de incidencia de viento (Figura 48) muestra que este tiene un comportamiento similar a lo visto en el oleaje, con una dirección reinante entre 108° y 144° (52.5% de ocurrencia), además de aportes importantes desde las direcciones 72° a 108° (33.2%). Las velocidades más frecuentes se encuentran entre 5.6 y 7.0 [m/s], con 38.2% de la data total, además del rango de 7.0 a 8.6 [m/s] que presenta una frecuencia de 24.5%<sup>6</sup>.

El viento de mayor intensidad proviene principalmente desde el SE, en torno a la dirección 135°, con velocidades por sobre los 9.0 [m/s]. De forma adicional, en Tabla 8 se exponen estadísticos de resumen de velocidad del viento, los cuales muestran que las velocidades máximas han alcanzado un valor cercano a 14.0 [m/s], mientras que el mínimo ha sido prácticamente nulo.

Tabla 8: Estadísticos de resumen de velocidad del viento.

Parámetro	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Velocidad del viento (W) [m/s]	6.43	13.91	0.06	1.50

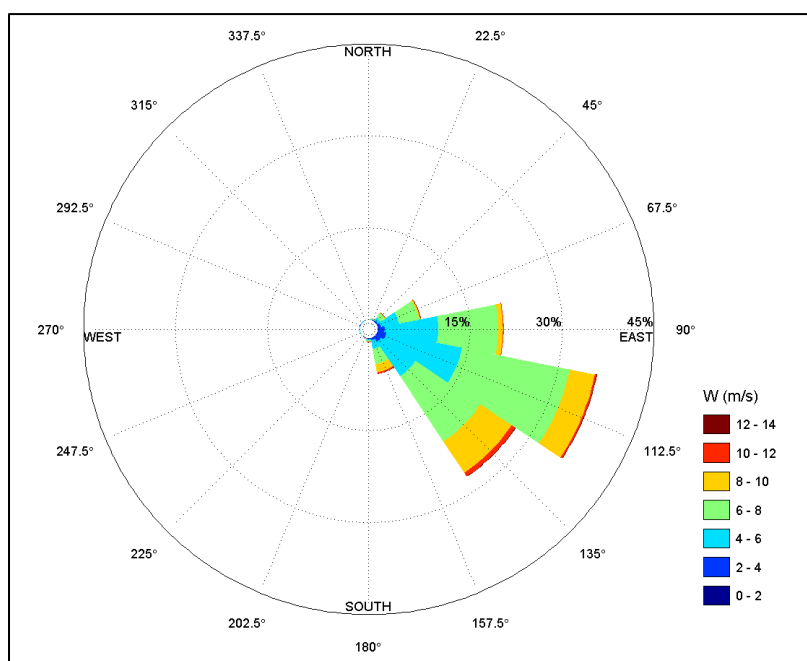


Figura 48: Rosa direccional de velocidad del viento.

<sup>6</sup> En Anejo 9.4 se adjunta tablas de incidencia (probabilidad conjunta) de velocidad y dirección del viento.



Las funciones de densidad y distribución de velocidad del viento de la Figura 49 muestran que este parámetro puede ser descrito según la distribución normal, con un valor medio de 6.4 [m/s] y valores sobre percentil de 95% cercanos a 9.0 [m/s]. En cuanto a la estacionalidad del viento, del diagrama de cajas de la Figura 50 se identifica un aumento de la velocidad en los meses de invierno (junio, julio y agosto), con valores medios entre 7.0 y 8.0 [m/s], además de alcanzar los valores máximos en la estación mencionada.

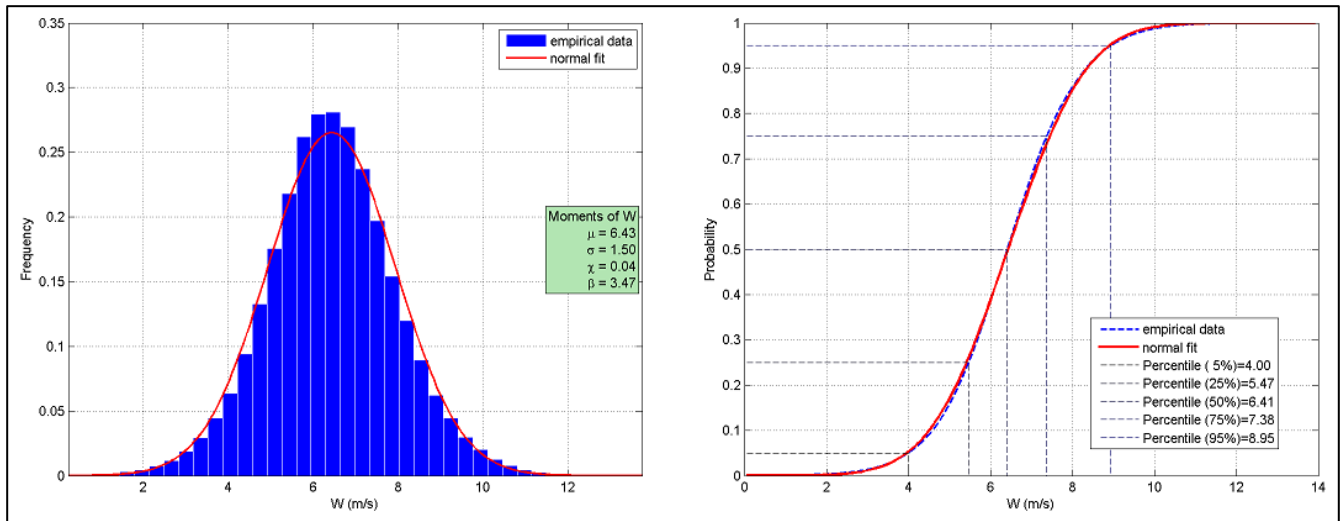


Figura 49: Izquierda: función de densidad; derecha: función de distribución.

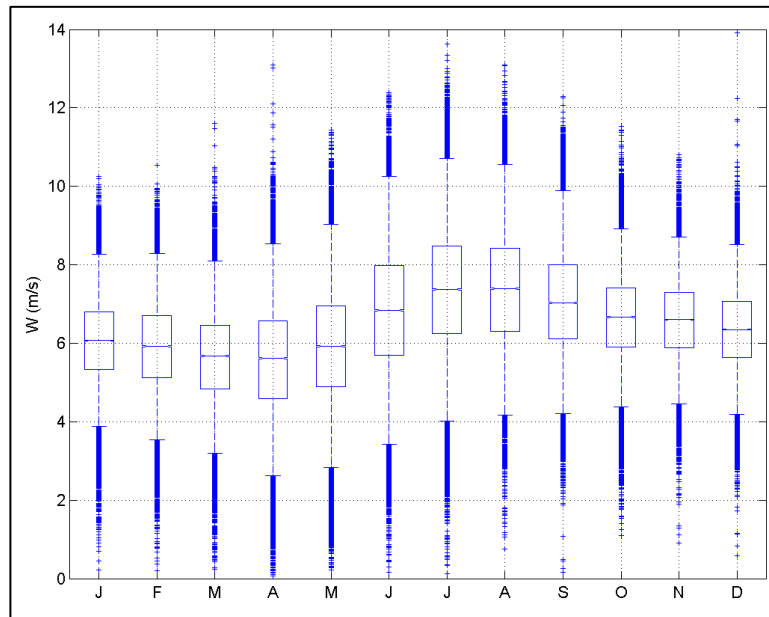
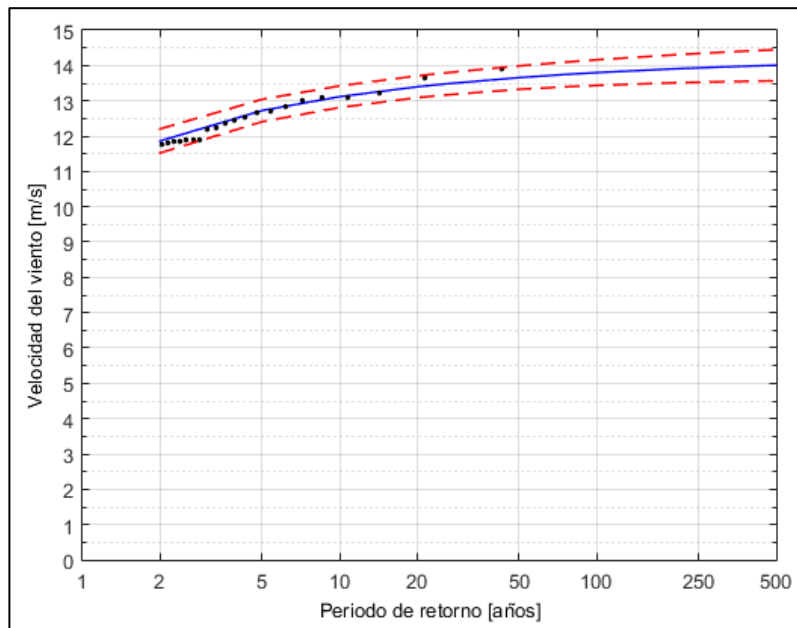


Figura 50: Diagrama de cajas de velocidad del viento mensual.

En cuanto al clima extremo de velocidad del viento, en la Figura 51 se presenta el resultado del análisis realizado por medio del método de máximos anuales. El ajuste llevado a cabo muestra que para un periodo de retorno de 2 años la velocidad del viento alcanza un valor de alta intensidad, cercano a 12 [m/s]. Adicionalmente, entre los periodos de 50 y 100 años, la velocidad del viento se encuentra entre 13.5 y 14.0 [m/s], valores que se han alcanzado dentro de la base de datos disponible.



**Figura 51: Resultados clima extremo de velocidad del viento.**

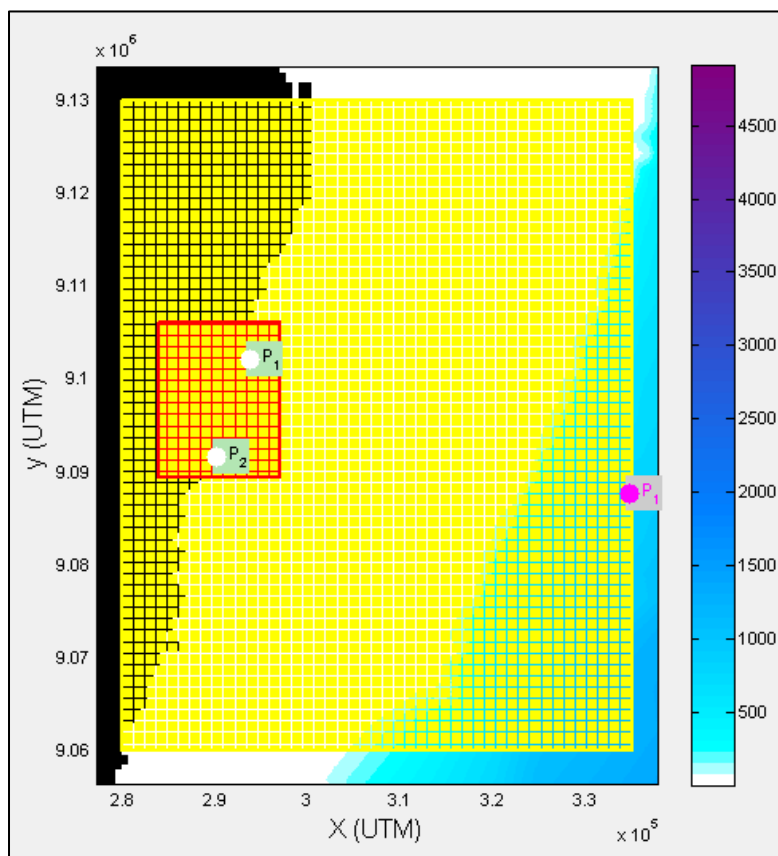
## 4.3 CONSIDERACIONES NUMÉRICAS Y ESTADOS DE MAR SELECCIONADOS

### 4.3.1 CONSIDERACIONES NUMÉRICAS

El primer paso dentro de la propagación llevada a cabo consiste en la definición de dominios de cálculo sobre la información batimétrica de la zona de estudio. Para el presente trabajo se han utilizado dos dominios regulares, con elementos de resolución 200x200 [m] y 25x25 [m] (Tabla 9), disminuyendo el tamaño de celda hacia la costa de modo de obtener una mayor precisión en el sector de interés. La condición de borde en aguas profundas se definió por medio de la ubicación geográfica de la base de datos de oleaje GOW, obteniendo los dominios que se presentan en la Figura 52.

**Tabla 9: Información de dominios de cálculo, IHPropaga.**

Dominio	Ubicación inicial UTM	Extensión (x,y)	Tamaño de celdas	Número de celdas
<b>General</b>	280000 [m] E; 9060000 [m] N	55000 [m]; 70000 [m]	200x200 [m]	275x350
<b>Detalle</b>	284000 [m] E; 9089400 [m] N	13000 [m]; 16600 [m]	25x25 [m]	520x664



**Figura 52: Dominios de cálculo para propagación de oleaje desde aguas profundas. Color amarillo: dominio general; color rojo: dominio de detalle.**

Las coordenadas geográficas de puntos objetivos (P1 y P2) de la propagación de oleaje se especifican en la Tabla 10.

**Tabla 10: Coordenadas geográficas de puntos objetivos en propagación de oleaje.**

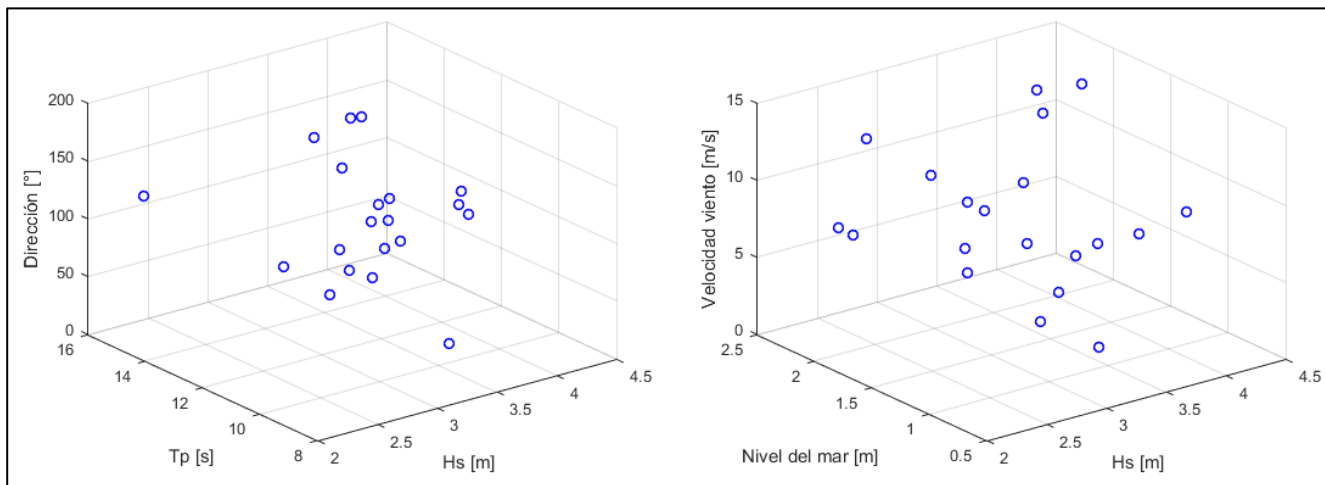
Punto	Coordenada X (UTM)	Coordenada Y (UTM)
<b>P1 (arrecife plataforma)</b>	293762 [m] E	9102119 [m] N
<b>P2 (arrecife franja)</b>	290209 [m] E	9091727 [m] N

Dentro de las consideraciones numéricas también se ha establecido un modo de propagación estacionario, con espectro JONSWAP definido por un parámetro de apuntamiento  $\gamma = 3.3$  y dispersión direccional  $\sigma = 20$ . Adicionalmente, se han incluido procesos físicos como interacción cuádruple entre olas, generación de oleaje por viento, rotura por efecto de viento, rotura de oleaje por fondo y fricción, todos con valores predeterminados por SWAN.

#### 4.3.2 ESTADOS DE MAR SELECCIONADOS

En base a la información de oleaje en aguas profundas, se seleccionaron 20 estados de mar con alturas de ola superiores a 2.0 [m], lo que implica condiciones sobre el percentil de 75% de  $H_s$ . Este valor fue establecido para posteriormente obtener condiciones iniciales que estén definidas por una cantidad de celdas que sean factibles de ejecutar con el modelo IH2VOF.

Además, se han considerado diferentes instantes de marea, lo que posteriormente permite realizar un análisis del coeficiente de transmisión en función del nivel de marea y la profundidad de los perfiles de arrecife de coral. En la Figura 53 se muestran las combinaciones de variables de clima marítimo para los estados de mar seleccionados, cuyo listado detallado se adjunta en Anejo 9.5.



**Figura 53: Combinación de variables de clima marítimo de estados de mar seleccionados.**

## 4.4 RESULTADOS DE PROPAGACIÓN

El resultado del proceso de propagación de estados de mar se muestra en la Figura 54, en la cual se realiza una comparación entre las condiciones de oleaje en profundidades indefinidas y lo obtenido frente a los perfiles en estudio, esto para altura significativa y dirección<sup>7</sup>. Se aprecia que en el proceso de propagación se produce una disminución de la altura de ola, lo cual queda en evidencia al identificar que todos los casos propagados se ubican por debajo de la bisectriz, sector que indica que la altura de ola es mayor en profundidades indefinidas.

La rosa con información direccional muestra que el oleaje al propagarse se ve afectado por el proceso de refracción, en el cual los frentes de ola buscan orientarse de forma paralela a la línea de costa, además de producir una disminución de  $H_s$ . Debido a esto, se aprecia que gran parte de los estados de mar propagados se ubican en un rango de direcciones entre  $112.5^\circ$  y  $135^\circ$ , con un caso cercano a  $90^\circ$  el cual incide con una dirección de  $30^\circ$  desde profundidades indefinidas.

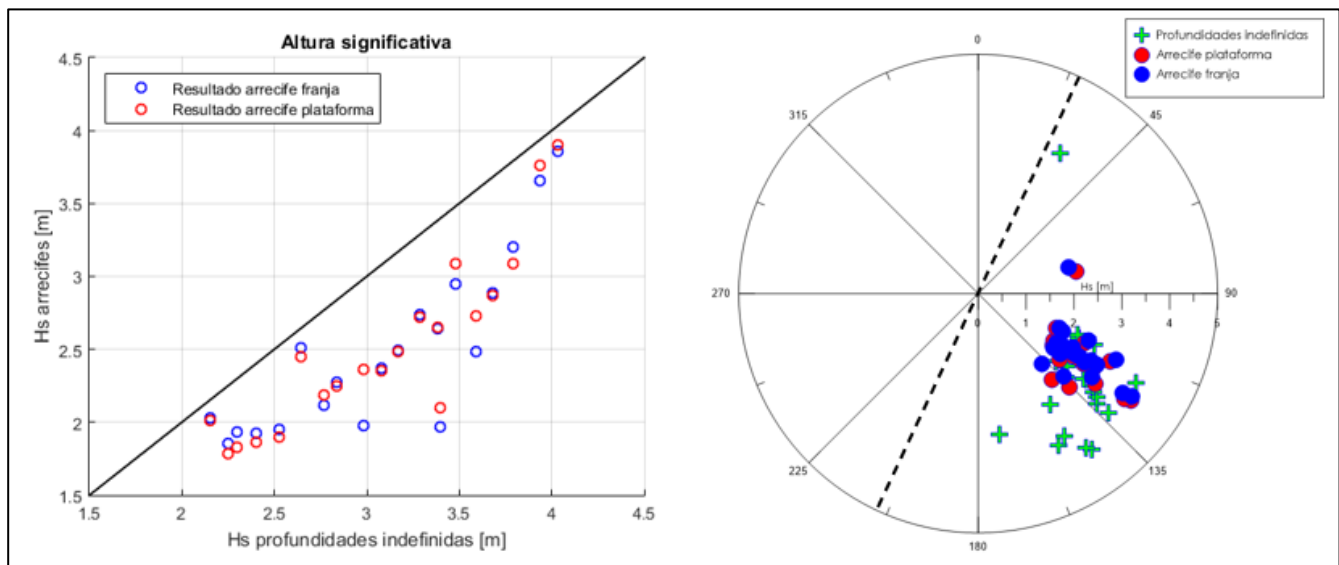
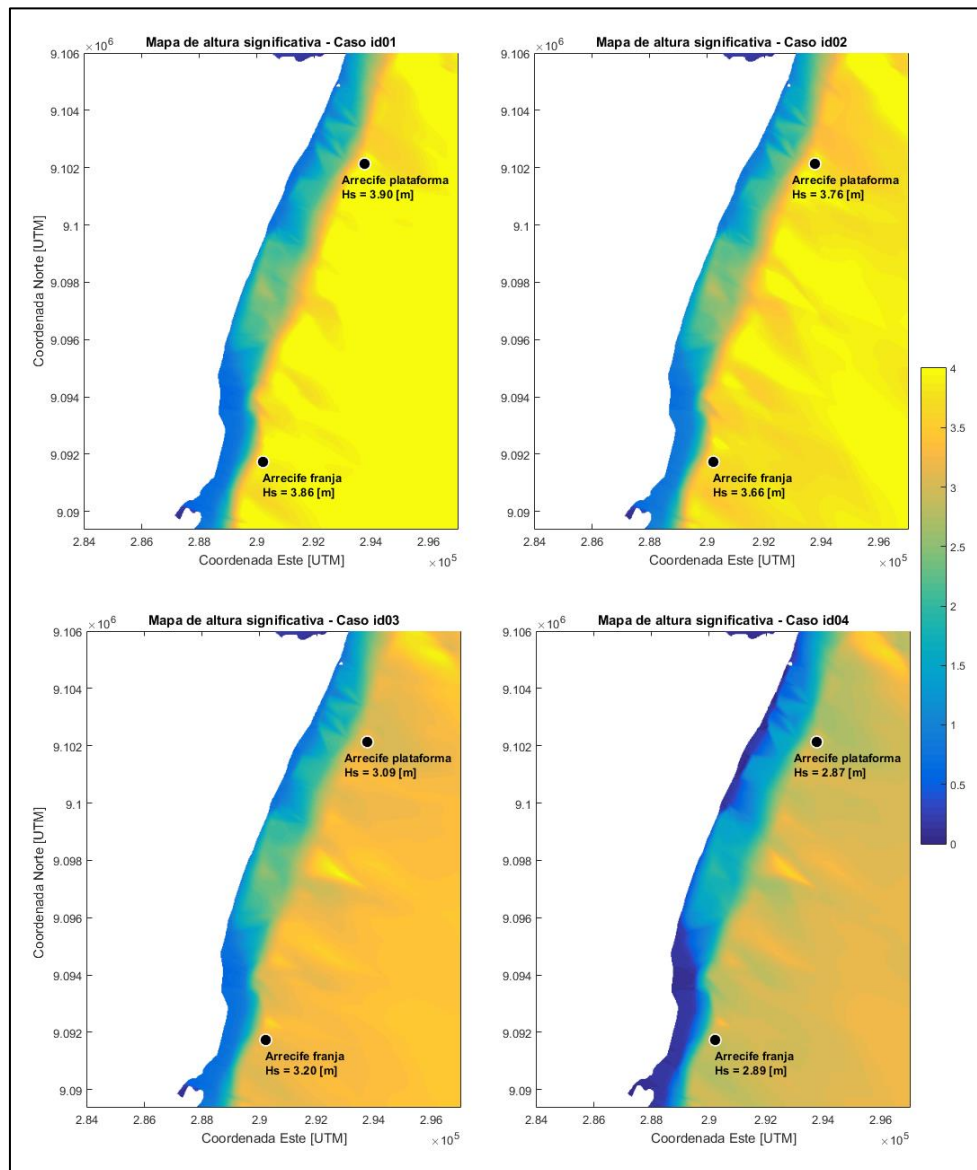


Figura 54: Resultados comparativos entre datos de profundidades indefinidas y propagación hacia perfiles de arrecife. Izquierda: Diagrama de dispersión de  $H_s$ ; derecha: rosa direccional y valores de  $H_s$  (orientación de línea de costa de Recife representada con línea discontinua negra).

<sup>7</sup> Tablas con resultados detallados se adjunta en Anejo 9.6.

En la Figura 55 se muestran los mapas de altura de ola significativa para los cuatro estados de mar seleccionados con mayor valor de  $H_s$  en profundidades indefinidas. Se aprecia que en el proceso de propagación las alturas de ola no sufren mayores procesos de transformación, además de los mencionados anteriormente. Al incluir los valores de  $H_s$  en los puntos de interés, que posteriormente serán las condiciones iniciales para el análisis del coeficiente de transmisión del capítulo 5, se identifican diferencias entre 0.02 y 0.11 [m] entre los puntos objetivo frente a los perfiles de arrecife de coral, sin un claro patrón que indique que el oleaje incide con mayor o menor intensidad frente a uno de los perfiles en estudio.



**Figura 55: Mapas de  $H_s$  para diferentes estados de mar propagados.**

## 5 ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN

Una vez que se ha validado la representación de la altura de ola transmitida por parte del modelo IH2VOF y se han propagado los estados de mar seleccionados frente a los perfiles en estudio con IHPropaga, se procede a analizar el coeficiente de transmisión actual y bajo efectos de cambio climático. Esto se logra con nuevas simulaciones de IH2VOF, ingresando como condiciones iniciales los resultados del capítulo 4 y bajo las consideraciones numéricas descritas en el capítulo 3.1.3.

Como se expuso en el capítulo 3.4.3, en las geometrías de arrecife de coral en estudio la influencia de la onda infragravitatoria no logra tener mayor significancia en comparación a las ondas de gravedad (periodos entre 1 y 30 [s]). Por lo tanto, las simulaciones realizadas para el análisis del coeficiente de transmisión se han llevado a cabo sin considerar la generación de oleaje con segundo orden, lo que además permite optimizar los recursos computacionales disponibles.

En el presente capítulo se exponen las consideraciones de mallado numérico y los resultados obtenidos para el coeficiente de transmisión, tanto para la condición actual, como para escenarios con efectos por cambio climático.

### 5.1 MALLADO

Además de los mallados numéricos utilizados en el proceso de validación, para las nuevas simulaciones con el modelo de detalle se elaboraron mallas adicionales, esto con el fin de cumplir con los criterios descritos en el capítulo 3.2, según las condiciones de oleaje transferido frente a los perfiles. Estos resultados muestran que los valores de  $H_s$  a utilizar como condiciones iniciales se encuentran en un rango entre 1.8 y 4.0 [m], por lo que las mallas deben lograr representar las alturas de ola de dicho intervalo.

Para esto se utilizaron tres mallas, las cuales fueron elaboradas considerando valores de  $H_s$  de 1.8, 2.0 y 3.0 [m], cuyas características se exponen en la Tabla 11. Para el tamaño de celdas en vertical se ha mantenido el criterio de  $\Delta y = H_i/10$  y para el eje horizontal una relación de  $\Delta x/\Delta y = 3.0$ .

Dentro de las características de las mallas numéricas (Tabla 11) se incluye el periodo pico mínimo y profundidad mínima en estación inicial ( $d_{\min}$ ). Esto permite determinar el valor de la longitud de onda ( $L$ ) para el cumplimiento del criterio que establece que ésta debe estar representada por al menos 100 celdas, ya que con menores valores de periodo y profundidad la longitud será menor, siendo necesaria una celda de menor tamaño. Cabe destacar que la profundidad mínima se ha determinado en base a la profundidad media en la estación inicial de cada perfil, sumado al mínimo valor de marea de las condiciones iniciales (0.51 [m]).



**Tabla 11: Características de mallas numéricas utilizadas en IH2VOF para análisis de coeficiente de transmisión.**

$H_s$ [m]	$T_p$ mín [s]	$\Delta y$	$\Delta x$	Arrecife plataforma			Arrecife franja		
				$d_{\min}$ [m]	L [m]	$L/\Delta x$	$d_{\min}$ [m]	L [m]	$L/\Delta x$
3.0	9.85	0.3	0.9	12.26	90.8	101	12.93	100.97	112
2.0	8.95	0.2	0.6	12.26	88.03	146	12.93	89.84	149
1.8	8.95	0.18	0.54	12.26	88.03	163	12.93	89.84	166

Por último, considerando que las alturas de ola a simular se encuentran entre 1.8 y 4.0 [m], con niveles de marea entre 0.5 y 2.2 [m] y profundidades medias en estación inicial de 12.42 [m] (arrecife franja) y 11.75 [m] (arrecife plataforma), los altos de dominio de las mallas elaboradas se han establecido entre 17 y 20 [m]. Esto permite representar de buena forma todos los estados de mar, optimizando el uso del recurso computacional disponible, ya que para bajos valores de altura de ola y marea no es necesario un dominio de gran altura, lo que si ocurre para los valores máximos de  $H_s$  y marea.

## 5.2 COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN ACTUAL

Los resultados del coeficiente de transmisión ( $K_t$ ) en condición actual se muestran en la Figura 56, en la cual se aprecia que para todos los casos simulados se obtiene una disminución de la altura de ola incidente, lo que se refleja con  $K_t$  menor a 1.

Se identifica que el arrecife tipo franja tiene una mayor capacidad de atenuación de la altura de ola, con valores de  $K_t$  que en general se encuentran bajo 0.3. Esta geometría presenta un aumento gradual del coeficiente de transmisión a medida que aumenta el nivel de marea, mostrando una relación directa entre la atenuación de la altura de ola y el calado sobre los arrecifes. En contraparte, el arrecife plataforma muestra un grado de dispersión considerable entre el coeficiente de transmisión y el nivel de marea, con valores de  $K_t$  por encima 0.3 y sin una tendencia tan clara en comparación a lo obtenido para el arrecife tipo franja.

En la Tabla 12 se expone un resumen estadístico de los resultados obtenidos, en la cual se aprecia que el menor valor del coeficiente de transmisión se alcanza para niveles de marea de 0.51 [m] en arrecife plataforma y 0.58 [m] en arrecife franja, con  $K_t$  de 0.31 y 0.06 respectivamente. Estos valores indican que, bajo las condiciones de marea indicadas, el arrecife tipo franja puede atenuar hasta en 94% la altura de ola, mientras que el arrecife plataforma lo puede hacer hasta un 69%. Esto se modifica de forma significativa en instantes de pleamar, reflejado en los valores máximos de  $K_t$ , los que muestran que en dichos instantes la altura de ola incidente puede ser disminuida en 20% y 79% por los arrecifes tipo plataforma y franja, respectivamente.

Tabla 12: Resumen estadístico de resultados de coeficiente de transmisión ( $K_t$ ).

Geometría	Media	Mínimo (marea [m])	Máximo (marea [m])
Arrecife tipo franja	0.14	0.06 (0.58)	0.21 (2.09)
Arrecife tipo plataforma	0.53	0.31 (0.51)	0.80 (1.98)

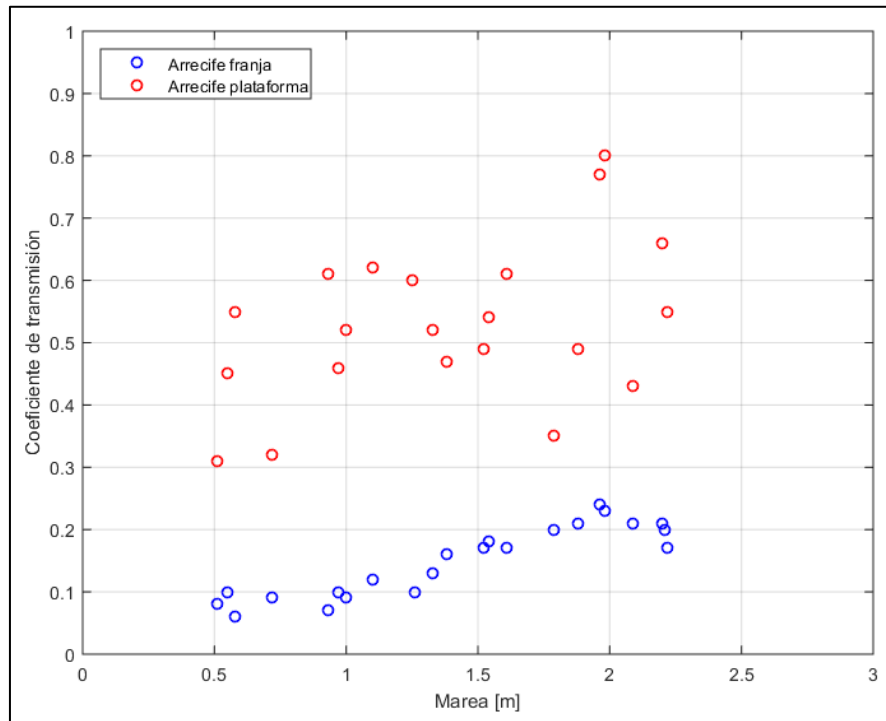
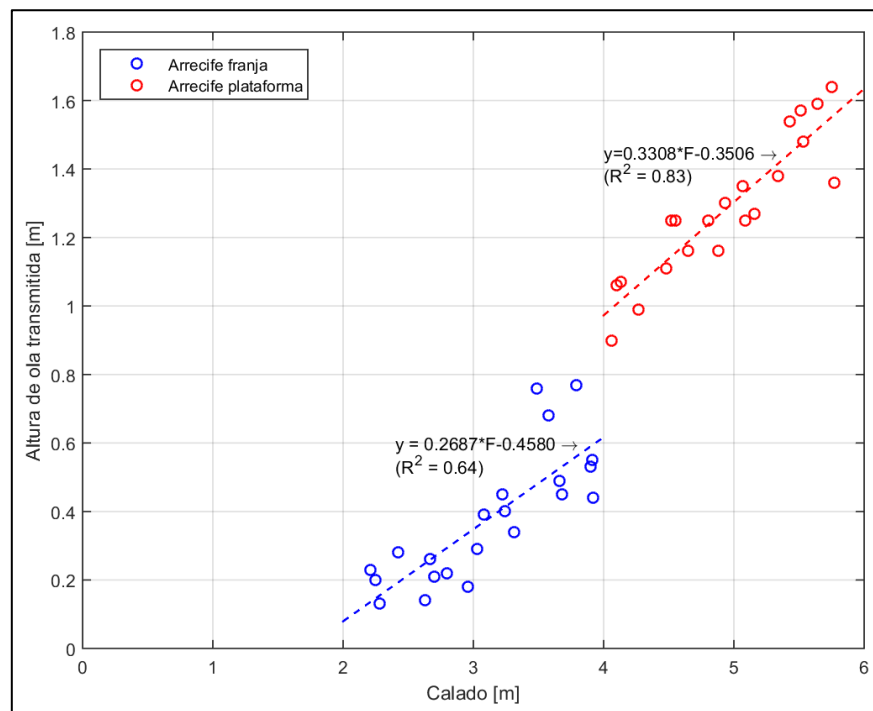


Figura 56: Diagrama de dispersión entre coeficiente de transmisión y marea.

Para condiciones de oleaje incidente con alturas significativas entre 0.80 y 2.11 [m], las mediciones de campo de Costa et al. (2015) reportan un coeficiente de transmisión con valor medio de 0.45 para el arrecife tipo plataforma, además de indicar que el valor de  $K_t$  de esta geometría nunca es menor a 0.33, incluso en instantes de bajamar. Para el arrecife tipo franja, en un rango de altura de ola significativa entre 1.16 y 2.69 [m], las mediciones de campo utilizadas como referencia indican que el coeficiente de transmisión presenta una media de 0.12, sin exceder un valor de 0.28. Además, se hace hincapié en la notoria relación identificada entre el valor de  $K_t$  y el instante de marea para el arrecife franja, lo cual no ocurre para arrecife plataforma. Esta información concuerda con lo obtenido mediante las simulaciones con el modelo IH2VOF, por lo que se considera que los resultados en este trabajo representan el proceso de transferencia de oleaje en los perfiles de arrecife de coral en estudio.

En la Figura 57 se muestra la relación de dispersión obtenida entre la altura de ola transmitida ( $H_t$ ) y el calado ( $F$ ) en la estación inicial. Nuevamente se identifica la mayor capacidad de atenuación de altura de ola por parte del arrecife tipo franja, con valores bajo 0.8 [m], mientras que en arrecife plataforma se supera 1.6 [m] en condiciones de calado en torno a 6.0 [m]. Es importante destacar que existe diferencia entre la elevación de los arrecifes y las profundidades medias consideradas en las estaciones iniciales de cada perfil (definidas en capítulo 3), lo que se evidencia al tener valores de calado de 2.0 a 4.0 [m] en arrecife franja y 4.0 a 6.0 [m] en arrecife plataforma.

La relación existente entre  $H_t$  y el calado se representa mediante una regresión lineal, ajustada de forma independiente para cada geometría en estudio, para la que se obtiene un mayor coeficiente de determinación ( $R^2$ ) en arrecife plataforma. Este ajuste permite obtener el valor de la altura de ola transmitida conociendo el calado, necesitando para este último el instante de marea de interés, ya que los parámetros de profundidad y elevación del arrecife son conocidos. Teniendo como dato inicial la altura de ola frente al perfil de interés, basta con reemplazar el valor de  $F$  en el ajuste lineal para obtener la altura de ola transmitida, con lo que finalmente es posible determinar el coeficiente de transmisión y el porcentaje de atenuación de la altura de ola incidente.



**Figura 57: Diagrama de dispersión entre altura de ola transmitida y calado, con ajuste por regresión lineal.**

### **5.3 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN POR EFECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

Conociendo el grado de atenuación de la altura de ola de los perfiles de arrecife de coral en estudio, se plantean escenarios con efectos por cambio climático para analizar la variación del coeficiente de transmisión. El primer caso corresponde a aumento del nivel medio del mar (NMM) en Recife, para luego incorporar una disminución en la elevación de la cresta de los arrecifes.

El análisis mencionado se lleva a cabo con el estado de mar de mayor intensidad de la selección realizada en el capítulo 4.3.2, el cual tiene un valor de  $H_s$  en profundidades indefinidas de 4.0 [m] y nivel de marea de 1.8 [m]. Esta condición es propagada con IHPropaga incluyendo el aumento del nivel medio del mar. Posteriormente, se realizan simulaciones con IH2VOF considerando las nuevas condiciones iniciales en cada perfil en estudio.

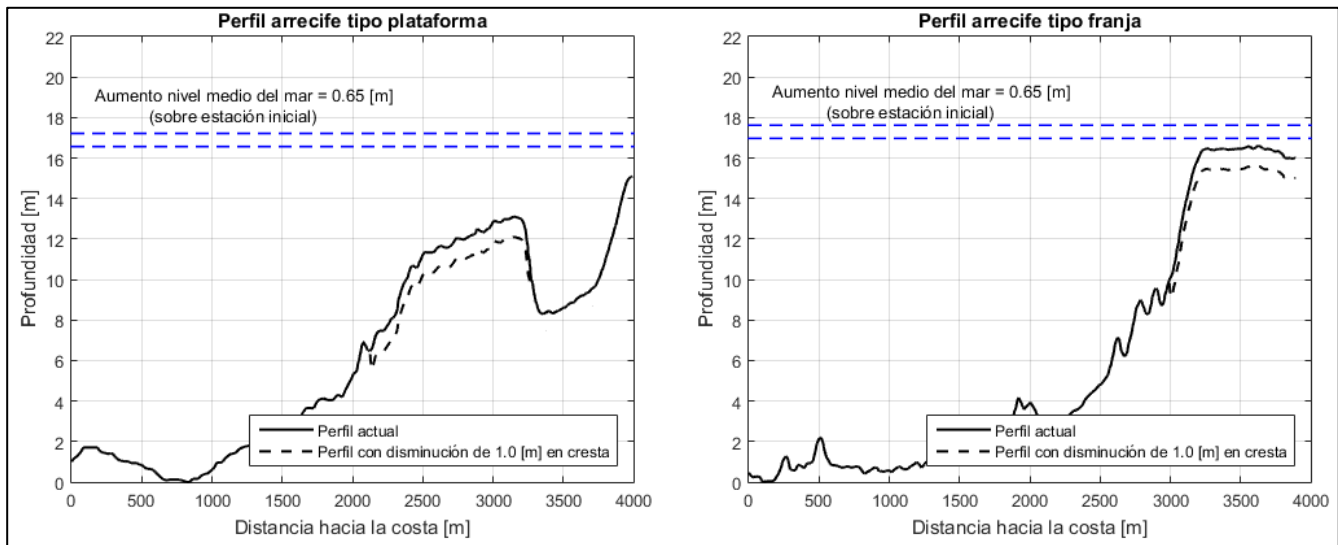
En el presente capítulo se especifican los efectos considerados por cambio climático y los resultados obtenidos para la variación del coeficiente de transmisión, comparando con los resultados obtenidos en condición actual.

#### **5.3.1 AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR Y PÉRDIDA DE ÁREA CORALINA EN RECIFE**

Análisis de las condiciones ambientales en el área metropolitana de Recife indican que los procesos de aumento del nivel del mar y la pérdida de cobertura de coral están ocurriendo actualmente (Costa et al., 2015). Según el estudio de Losada et al. (2020), las proyecciones regionales para América Latina y el Caribe del aumento del nivel medio del mar a fin de siglo (periodo 2081-2100 con respecto a 1983-2005) para el escenario RCP 8.5, indican que en la zona de Recife en promedio el nivel del mar aumentaría entre 0.6 y 0.65 [m] (capítulo 1.1.3, Figura 14).

En relación a la mortalidad de los arrecifes de coral en el área, se estima que sobre el 80% de la cobertura de coral se ha perdido en las últimas cuatro décadas, debido principalmente a la alta presión de asentamientos urbanos. Además, hasta la década de 1970, la minería de corales fue una práctica común en los arrecifes de coral de Brasil, siendo las mayores beneficiadas las refinerías de azúcar que hacían uso de la cal extraída (Costa et al., 2015). Como se mencionó en el capítulo 1.1.3, uno de los efectos del aumento de la temperatura superficial del mar es la acidificación, lo que modifica el pH de las aguas costeras y los procesos de calcificación de organismos como corales, provocando el blanqueamiento y posterior pérdida de las coberturas coralinas. Estudios recientes muestran que, desde 1980, el pH continúa descendiendo en el océano y que, independientemente del escenario considerado, se proyecta un aumento de la acidificación hacia fines de siglo (Losada et al., 2020).

Con estos antecedentes, es probable que la degradación o pérdida de la cobertura de coral en los arrecifes conlleve a una disminución considerable del servicio de protección costera por parte de estos ambientes naturales, con mayor exposición ante episodios de inundación y/o erosión en playas (Losada et al., 2020). Para cuantificar la variación de atenuación de la altura de ola incidente, se considera una disminución de 1.0 [m] en la cresta de los perfiles de arrecife en estudio, lo que concuerda con lo establecido por Beck et al. (2018), además de un aumento de 0.65 [m] en el nivel medio del mar hacia fines de siglo (Figura 58).



**Figura 58: Perfiles de arrecife con aumento del nivel medio del mar y disminución en elevación de cresta.**

### 5.3.2 RESULTADOS DE COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN CON EFECTOS POR CAMBIO CLIMÁTICO

Previamente a analizar la variación del coeficiente de transmisión, en la Figura 59 se muestra el mapa de altura significativa que compara el resultado de la simulación realizada con IHPropaga en el capítulo 4 ( $H_s$  actual) y la ejecución considerando el aumento del nivel medio del mar ( $H_s$  futuro), en el cual los valores positivos indican que el valor de  $H_s$  es mayor para esta última condición. Comparando los valores de  $H_s$  obtenidos frente a los perfiles en estudio se identifica un aumento de este parámetro de 0.05 [m] para arrecife franja y 0.13 [m] en arrecife plataforma, lo que se debe principalmente al aumento del nivel medio del mar incorporado.

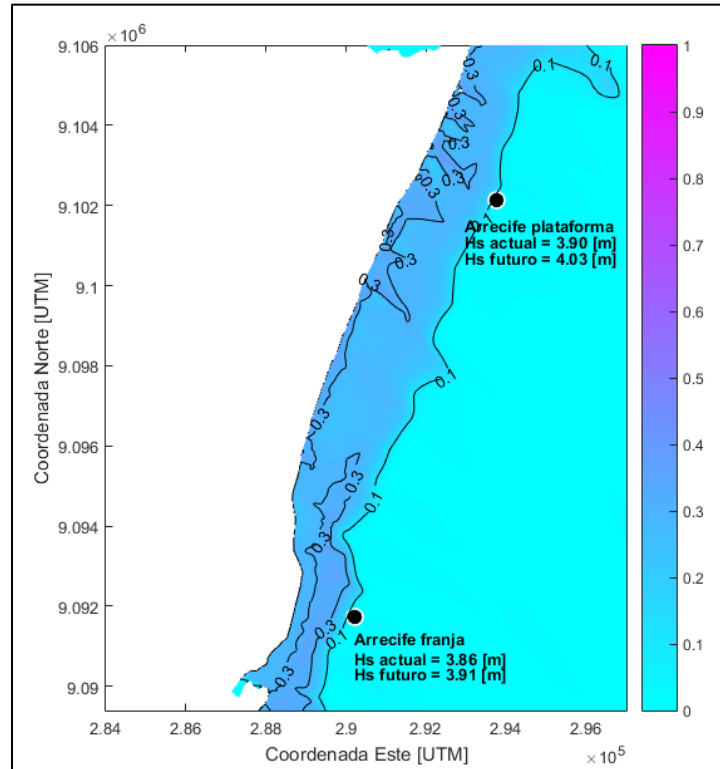


Figura 59: Mapa comparativo de  $H_s$  entre propagación con aumento del nivel medio del mar y propagación.

La Figura 60 muestra la evolución de la altura significativa de ola, para el estado de mar seleccionado bajo condición actual y para los casos simulados con efectos por cambio climático, identificando que para éstos últimos el valor de  $H_s$  es mayor, principalmente una vez que el oleaje interactúa con la cresta del arrecife. Se aprecia que, al considerar los efectos de aumento de nivel medio del mar y disminución de la elevación de la cresta coralina de forma conjunta, en arrecife plataforma la altura de ola comienza a disminuir a 2580 [m] hacia la costa, mientras que en la actualidad lo hace a 2480 [m]. En el arrecife tipo franja se identifica que la variación de altura de ola actualmente se produce a 3060 [m] hacia la costa, cambiando a 3160 [m] bajo el escenario con aumento del NMM y disminución de cresta coralina. Los cambios mencionados se deben al mayor calado sobre la cresta de los perfiles al incorporar los efectos por cambio climático, lo que modifica la forma en que el oleaje interactúa con el fondo.

En la Tabla 13 se presentan los resultados de la variación de la capacidad de atenuación de la altura de ola incidente, bajo el escenario de cambio climático con aumento del nivel medio del mar. Se aprecia que los mayores cambios se producirían para el arrecife plataforma, con un aumento de 0.48 [m] en la altura de ola transmitida en comparación a la condición actual, lo que se traduce en un incremento de 31% en el coeficiente de transmisión ( $K_{t\_futuro}/K_{t\_actual} = 1.31$ ). Para el arrecife tipo franja, el aumento de la altura de ola transmitida es de 0.19 [m], aumentando el coeficiente de transmisión en 20% ( $K_{t\_futuro}/K_{t\_actual} = 1.20$ ).

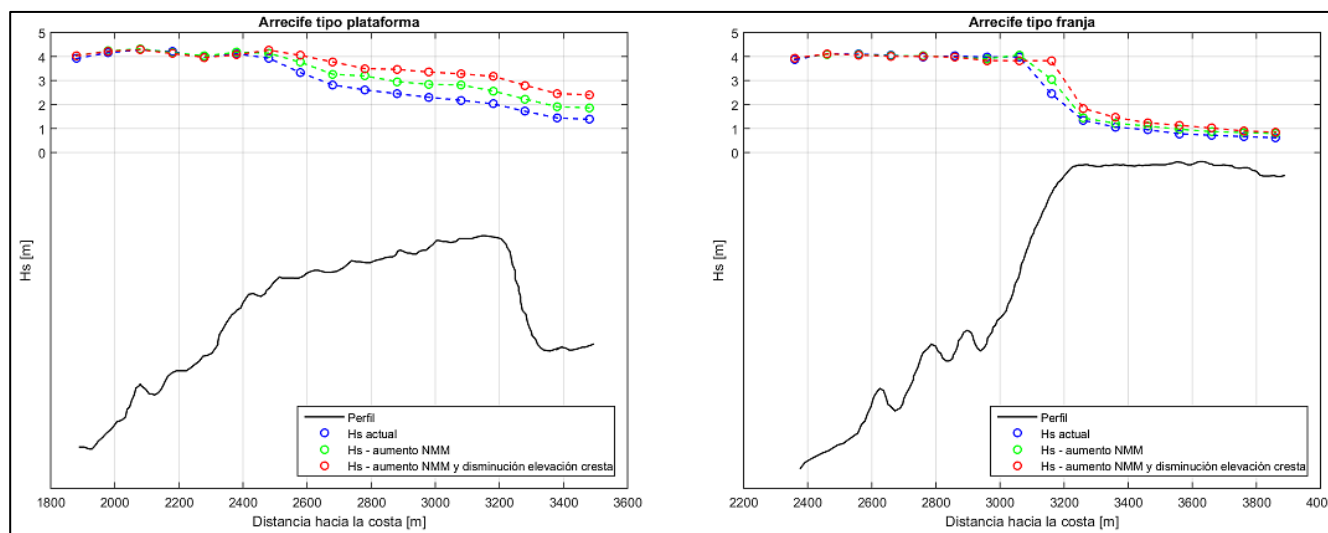


Figura 60: Evolución  $H_s$  caso actual y escenarios con efectos por cambio climático.

Tabla 13: Variación de atenuación de la altura significativa incidente, escenario con aumento del nivel medio del mar.

Geometría	Actual			Aumento nivel medio del mar				
	$H_{Si}$ [m]	$H_{St}$ [m]	$K_t$	$H_{Si}$ [m]	$H_{St}$ [m]	$K_t$	$\Delta H_{St}$ [m]	$K_{t\_futuro}/K_{t\_actual}$
Franja	3.86	0.76	0.20	3.91	0.95	0.24	0.19	1.20
Plataforma	3.90	1.38	0.35	4.03	1.86	0.46	0.48	1.31

Incorporando una disminución de 1.0 [m] en la elevación de la cresta, los resultados de la Tabla 14 muestran que la pérdida del servicio de protección por parte de los arrecifes de coral sería aún más notoria, con las mayores variaciones en el arrecife plataforma, en el que el coeficiente de transmisión aumentaría en 69% ( $K_{t\_futuro}/K_{t\_actual} = 1.69$ ). En el arrecife tipo franja la altura de ola transmitida aumenta en 0.34 [m], alcanzando un valor de 1.10 [m] para el caso considerado y aumentando el coeficiente de transmisión en 40% ( $K_{t\_futuro}/K_{t\_actual} = 1.40$ ).

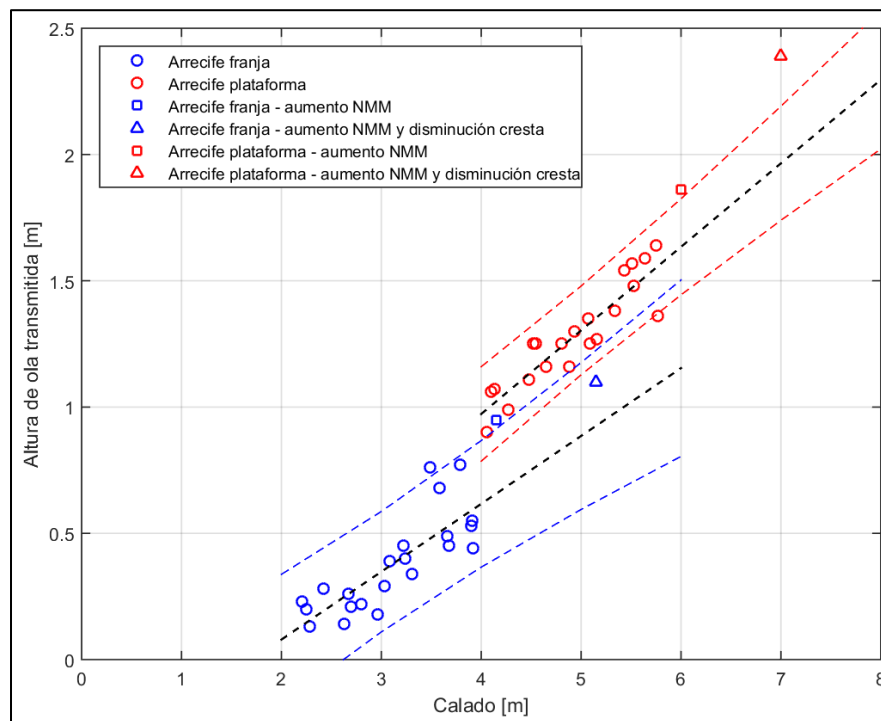
Tabla 14: Variación de atenuación de la altura significativa incidente, escenario con aumento del nivel medio del mar y disminución de la elevación de la cresta de arrecife.

Geometría	Actual			Aumento nivel medio del mar + Disminución cresta de arrecife				
	$H_{Si}$ [m]	$H_{St}$ [m]	$K_t$	$H_{Si}$ [m]	$H_{St}$ [m]	$K_t$	$\Delta H_{St}$ [m]	$K_{t\_futuro}/K_{t\_actual}$
Franja	3.86	0.76	0.20	3.91	1.10	0.28	0.34	1.40
Plataforma	3.90	1.38	0.35	4.03	2.39	0.59	1.01	1.69



Al igual que en el capítulo 5.2, en la Figura 61 se muestra el diagrama de dispersión entre altura de ola transmitida y calado, esta vez agregando los resultados de las simulaciones considerando efectos por cambio climático y las bandas de confianza de 95% de los ajustes lineales del capítulo 5.2. Se aprecia que para el arrecife plataforma los dos casos que incorporan efectos por cambio climático se encuentran fuera de la banda de confianza superior, principalmente por el aumento de la altura de ola transmitida descrito anteriormente. Esto indica que estos escenarios no podrían ser descritos en base a los ajustes actuales, siendo necesaria una mayor cantidad de simulaciones que incorporen aumento del NMM y pérdida de la cobertura coralina, para posteriormente obtener un ajuste que describa específicamente este tipo de condiciones.

En el arrecife tipo franja, la simulación que considera sólo aumento del NMM se ubica dentro de la banda de confianza inferior del ajuste realizado para el arrecife plataforma, lo que indica que no logra ser descrita por el ajuste de su tipología correspondiente. Por otra parte, el caso que posee aumento del NMM y disminución de la elevación de la cresta se ubica dentro de la banda de confianza superior, siendo el único caso que podría ser descrito según el ajuste lineal realizado para las condiciones actuales. Sin embargo, estas conclusiones se basan en una única condición de oleaje, por lo que más simulaciones serían necesarias para poder hacer una estimación más robusta de los coeficientes de transmisión en escenarios futuros.



**Figura 61: Diagrama de dispersión entre altura de ola transmitida y calado, con ajuste por regresión lineal (líneas punteadas negras) y bandas de confianza de 95% (línea punteada azul: arrecife franja; línea punteada roja: arrecife plataforma).**

## 6 DISCUSIÓN

La disponibilidad de información de mediciones de campo que describan los procesos de transferencia de oleaje en ambientes de arrecife de coral, corresponde a una de las principales limitantes dentro del trabajo desarrollado, la que como se ha indicado a lo largo de este documento, ha sido obtenida de Costa et al. (2015). Esto resulta ser un factor relevante al momento de validar los resultados obtenidos con IH2VOF, ya que existen condiciones hidrodinámicas que no son descritas en detalle dentro de la referencia bibliográfica utilizada, específicamente para las mediciones de oleaje de tormenta en la zona de Recife. Sin embargo, se ha demostrado que las consideraciones numéricas establecidas han permitido describir de buena forma los procesos involucrados en la interacción entre el oleaje incidente y las características batimétricas de los arrecifes de coral.

La elevación y extensión de los arrecifes ha resultado ser uno de los aspectos de mayor importancia al momento de analizar la atenuación de la altura de ola incidente. El arrecife plataforma posee un calado sobre su cresta que no produce una disminución repentina de la altura de ola, por lo que se intuye que no se produce la rotura de oleaje en este punto, sino que la disipación de energía ocurriría a medida que las olas recorren el arrecife. Por otra parte, la elevación máxima sobre la cresta del arrecife tipo franja se encuentra cercana a la superficie del agua, por lo que gran parte de las olas al llegar a este punto rompen, disipando gran parte de su energía. Las características y procesos mencionados hacen que la altura de ola transmitida en arrecife franja no supere los 0.8 [m], mientras que para el arrecife plataforma en todos los casos simulados se obtienen resultados sobre dicho valor, dejando en evidencia que el arrecife tipo franja proporciona un mayor servicio de protección.

El análisis de onda infragravitatoria para oleaje generado con componentes de segundo orden, llevado a cabo para las simulaciones de validación de IH2VOF, ha buscado cuantificar la importancia que tiene la liberación de este tipo de ondas en los ambientes coralinos. La rotura de oleaje inducida por la cresta del arrecife tipo franja produce la disipación de las ondas de menor periodo, liberando la onda infragravitatoria asociada al oleaje irregular, provocando que la altura de ola en el punto de control provenga principalmente de componentes de baja frecuencia (altos periodos), lo que no ocurre en arrecife plataforma. Cabe destacar que este tipo de análisis no se ha llevado a cabo dentro del estudio del coeficiente de transmisión, debido a que requiere un mayor recurso computacional del cual no se dispone, y la influencia de la onda larga no se considera determinante en el análisis de coeficientes de transmisión en los perfiles en estudio.

La incorporación de efectos por cambio climático, específicamente aumento del nivel medio del mar y disminución en la elevación de la cresta de los arrecifes, deja en evidencia la reducción del servicio de protección, lo que influye directamente en la exposición del borde costero ante episodios de oleaje de mayor intensidad. A pesar de esto, dicho análisis se ha llevado a cabo bajo un escenario pesimista de aumento del NMM y disminuyendo en 1.0 [m] la cresta de los arrecifes según lo analizado por Beck et al. (2018) en la Riviera Maya (México), sin incluir variaciones de altura de ola o intensidad del viento. Por lo tanto, los resultados expuestos aplican de forma específica para las condiciones establecidas en el capítulo 5.3.

## 7 CONCLUSIONES

La metodología planteada y la aplicación de modelos numéricos para simulación de condiciones de oleaje, han permitido llevar a cabo un trabajo en el que se ha logrado validar los resultados del modelo IH2VOF con mediciones de campo, para luego analizar la transferencia de oleaje a lo largo de perfiles de arrecife de coral tipo franja y plataforma en la localidad de Recife, cuyas conclusiones se exponen en el presente capítulo.

En cuanto a la validación del modelo IH2VOF con mediciones de campo se obtiene:

- En arrecife plataforma se logra un ajuste al límite superior del coeficiente de transmisión obtenido en mediciones de campo, mostrando que para una condición de tormenta y un nivel de marea de 1.25 [m] la altura de ola se logra atenuar en un 40%. Además, se ha identificado un aumento de los periodos de ola, con valores significativos iniciales en torno a los 10 [s], que luego superan los 12 [s] en el punto de control.
- En arrecife franja, para una condición de oleaje medio la altura de ola se atenúa en un 90%, mientras que para condición de tormenta se obtiene una disminución de 80%, lo que se debe principalmente a un mayor nivel de marea en la simulación de oleaje de tormenta. Para esta geometría, el aumento de los periodos de ola es mucho más notorio en comparación al arrecife plataforma, con periodos significativos que alcanzan los 80 [s] en la estación de control, dejando en evidencia que la liberación de la onda infragravitatoria (periodos de ola sobre 30 [s]) tiene mayor relevancia en el perfil de arrecife tipo franja.

El análisis del coeficiente de transmisión en condiciones actuales muestra que:

- El arrecife tipo franja presenta una mayor capacidad de atenuación de la altura de ola en comparación al arrecife plataforma, con valores del coeficiente de transmisión que se encuentran bajo 0.3 (atenuación de 70%), pudiendo atenuar hasta en 94% la altura de ola incidente en condición de bajamar. Esta geometría muestra una relación directa entre la atenuación de la altura de ola y el calado sobre los arrecifes, lo que hace referencia a un aumento de  $K_t$  a medida que aumenta el nivel de marea.
- Por otra parte, el arrecife plataforma logra disminuir hasta en un 69% la altura de ola en instantes de bajamar. De forma contraria al arrecife franja, esta tipología muestra un grado de dispersión considerable entre el coeficiente de transmisión y el nivel de marea, con valores de  $K_t$  por encima de 0.3 y sin una tendencia tan clara para los diferentes niveles de marea considerados.
- Los resultados descritos muestran de forma clara que los arrecifes de coral estudiados proporcionan un servicio de protección importante en Recife, actuando como obras de protección naturales que logran disipar gran parte de la energía del oleaje, lo que además puede conllevar a la mantener estabilidad de la línea de costa.

Incorporando efectos por cambio climático, las variaciones del coeficiente de transmisión indican que:

- En general se obtiene una disminución del servicio de protección, con una mayor pérdida en la capacidad de atenuar la altura de ola por parte del arrecife plataforma. Al aumentar el nivel medio del mar, para la condición de oleaje simulada el arrecife plataforma aumenta en 31% su coeficiente de transmisión, mientras que el arrecife franja lo hace en 20%.
- Lo anterior se acentúa al considerar de forma conjunta el aumento del nivel medio del mar y la disminución de la cresta coralina, escenario en que aumenta en 69% y 40% el coeficiente de transmisión de los arrecifes plataforma y franja respectivamente. Estos resultados indican que la pérdida de cobertura coralina en la cresta tendría igual o incluso mayor relevancia al momento de analizar los efectos por cambio climático en la atenuación de la altura de ola, dejando en evidencia la importancia de estos ambientes naturales y el servicio de protección que proporcionan.
- Los valores de altura de ola transmitida provenientes de las simulaciones realizadas con efectos por cambio climático, no logran ser descritas de buena forma mediante el ajuste lineal de las condiciones actuales. Por lo tanto, para intentar predecir valores futuros de dicho parámetro, es necesario llevar a cabo una cantidad de simulaciones en las que se logre hacer un nuevo ajuste para los resultados obtenidos con efectos por cambio climático.

Como futuras líneas de investigación se propone:

- Ampliar estudio considerando una mayor cantidad de geometrías de arrecifes de coral, ya sea en Recife y/o en otras zonas de interés, con el fin de seguir cuantificando el servicio de protección proporcionado por estos ambientes naturales, buscando promover su cuidado y mantención.
- Profundizar en el análisis sobre la influencia de la onda infragravitatoria, con una mayor cantidad de simulaciones de condiciones hidrodinámicas e incorporando escenarios de cambio climático, lo que permita identificar si podrían representar una amenaza mayor a lo largo de la línea de costa. Este análisis debería incluir el estudio del run-up en la costa, proceso en el que la influencia de la onda larga es especialmente relevante.
- Incorporar proyecciones de incrementos de altura de ola y velocidad del viento en el análisis de la variación del coeficiente de transmisión, ya que la reducción del servicio de protección podría ser aún mayor al considerar estos escenarios.
- Estudiar diferentes escenarios de cambio climático considerando los correspondientes efectos para tener una mejor caracterización de las posibles condiciones futuras y su afección a los corales.

## 8 REFERENCIAS

- Beck, M.W., Losada, I.J., Menendez, P., Reguero, B.G., Diaz-Simal, P. y Fernandez, F. 2018. The global food protection savings provided by coral reefs. *Nature Communications*, 9, artículo 2186.
- Buckley, M.L., Lowe, R.J., Hansen, J.E., Van Dongeren, A.R. 2015. Dynamics of wave setup over a steeply sloping fringing reef. *J. Phys. Oceanogr.* 45 (12), 3005-3023.
- Costa, M., Araújo, M., Araújo, T. y Siegle E. 2015. Influence of reef geometry on wave attenuation on a Brazilian coral reef.
- Darwin, C. R. 1842. The structure and distribution of coral reefs. London: Smith, Eelder and Co., 214 pp.
- De Andrés, M. y Barragán, J.M. 2015. Development of coastal cities and agglomerations: pressure and impacts on coastal and marine ecosystems.
- De Andrés, M. y Barragán, J.M. 2016. Desarrollo urbano en el litoral a escala mundial. Método de estudio para su cuantificación. *Revista de Estudios Andaluces*, vol. 33 (1), 64-83.
- Demirbilek, Z., Nwogu, O.G., Ward, D.L. 2007. Laboratory study of wind effect on runup over fringing reefs. Report 1. Data report, DTIC Document.
- Dominguez, J.M., Bittencourt, A.C., Leão, Z. y Azevedo, A. 1990 Geologia do quaternário costeiro do estado de Pernambuco.
- Elliff, C., Silva, I., Cánovas, V. y González, M. 2019. Wave attenuation and shoreline protection by a fringing reef system.
- Ferrario, F., Beck, M., Storlazzi, C., Micheli, F., Shepard, C. y Airolidi, L. 2014. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation.
- Guannel, G., Arkema, K., Ruggiero, P. y Verutes, G. 2016. The power of three: coral reefs, seagrasses and mangroves protect coastal regions and increase their resilience.
- Holthuijsen, L. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. *Climate change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2019. *The ocean and cryosphere in a changing climate*.
- Lara, J., Losada, I.J., Maza, M. y Guanche, R. 2011. Breaking solitary wave evolution over a porous underwater step.
- Lara, J., Ruju, A. y Losada, I. 2011. Reynolds averaged Navier-Stokes modelling of long waves induced by transient wave group on a beach.

- Losada, I.J., Lara, J., Maza, M. y Menendez, P. 2014. Numerical modelling of coastal protection by vegetation using a CFD model.
- Losada, I.J., M. Gómez-Erache, C. Lacambra, E. Rivera, R. Silva y A. Toimil. 2020. Zonas costeras. En: Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países Iberoamericanos.
- Márquez, G. 1996. Biodiversidad marina: aproximación con referencia al Caribe. Trabajo de tesis para optar al grado de Doctor en Ecología Tropical, Universidad de Los Andes, Venezuela.
- Maza, M., Lara, J. y Losada, I. 2013. A coupled model of submerged vegetation under oscillatory flow using Navier-Stokes equations.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE, Computers & Geosciences, 28(8): 929-937, doi:10.1016/S0098-3004(02)00013-4.
- Roeber, V. y Bricker, J. 2015. Destructive tsunami-like wave generated by surf beat over a coral reef during Typhoon Haiyan.
- Scherer, M., Asmus, M., Filet, M., Sanches, M. y Poleti, A. E. 2011. El manejo costero en Brasil: análisis de la situación y propuestas para una posible mejora.
- Sheppard, C., Dixon, D., Gourlay, M., Sheppard, A. y Payet, R. 2005. Coral mortality increases wave energy reaching shores protected by reef flats: Examples from the Seychelles.
- Universidad de Cantabria (UNICAN) 2000. Documento de referencia Volumen I: Dinámicas. Grupo de Oceanografía y de Costas.
- Yamano, H., Kayanne, H. y Chikamori, M. 2005. An overview of the nature and dynamics of reef islands.
- Zhao, M., Zhang, H., Zhong, Y., Jiang, D., Liu, G., Yan, H., Zhang, H., Guo, P., Li, C., Yang, H., Chen, T. y Wang, R. 2019. The status of coral reefs and its importance for coastal protection: A case of study of northeastern Hainan Island, South China Sea.

## 9 ANEJOS

### 9.1 DESCRIPCIÓN MODELO NUMÉRICO IH2VOF

El modelo numérico IH2VOF es un modelo desarrollado en el IHCantabria orientado al estudio de la interacción flujo-estructura, es decir, al estudio de la acción del oleaje sobre estructuras marítimas y la hidrodinámica en la zona de rompientes.

IH2VOF es un modelo en plena expansión y el más avanzado entre los de su categoría para el estudio de la interacción oleaje-estructura. Entre sus principales características destacan su capacidad para la simulación de todo tipo de estructuras marítimas a escala de prototipo o laboratorio; proporciona el campo de velocidades, presiones y turbulencia en un dominio bidimensional en vertical; y es capaz de simular todo tipo de oleajes: regular, irregular, onda solitaria, etc. Todo ello proporciona al modelo IH2VOF una gran versatilidad, siendo capaz de simular dominios a escala de prototipo de hasta un kilómetro. El IHCantabria ha calibrado y validado el modelo para el caso de diques en talud de materiales sueltos mediante numerosos ensayos de laboratorio, además de haber sido aplicado al diseño de obras marítimas.

IH2VOF resuelve las ecuaciones bidimensionales de Navier-Stokes, con el promediado de Reynolds, para tener en cuenta el papel de los procesos turbulentos del flujo. Así, cuenta con un modelo de cierre turbulento  $k - \varepsilon$  para la resolución de la turbulencia. Para la resolución de los medios porosos, como son los mantos de las estructuras de materiales sueltos, se realiza un promediado en un volumen de control. En esos casos por tanto el modelo resuelve las llamadas ecuaciones VARANS (Volume-Averaged/Reynolds-Averaged Navier-Stokes). El seguimiento de la superficie libre se resuelve mediante la técnica VOF (Volume Of Fluid).

En el desarrollo del modelo IH2VOF, se ha prestado una especial atención a los procesos de generación/absorción del oleaje. El modelo cuenta con un sistema de generación basado en una condición de Dirichlet en el que se introduce en el dominio las velocidades horizontal y vertical, así como la superficie libre, de la serie de oleaje a generar. Además, cuenta con un algoritmo matemático, basado en contornos móviles (moving boundaries), que permite simular el movimiento de una pala generadora del oleaje (pala dinámica). Ambos sistemas de generación cuentan con un sistema de absorción activa del oleaje reflejado en las estructuras. Así mismo, el modelo dispone de un sistema de generación en que permite absorber el oleaje sin la necesidad de la utilización de esponjas o zonas de fricción que conllevarían un mayor dominio computacional, con el consiguiente coste asociado.

En resumen, la calidad y precisión de los resultados de validación del modelo IH2VOF ha sido avalada por la comunidad científica internacional. El modelo es capaz de proporcionar el campo de velocidades, presiones y turbulencia en un dominio bidimensional, siendo capaz de resolver los procesos de transformación costera del oleaje (asomeramiento), la rotura del oleaje, la reflexión y la interacción con las estructuras (verticales y en talud). Es también de destacar su capacidad para la determinación del flujo sobre una estructura, el rebase y la transmisión, tanto en el fluido como en el interior de los medios porosos. Esto permite reproducir numéricamente los procesos no lineales que tienen lugar en la zona de rompientes y en la zona de ascenso y descenso del oleaje sobre una



playa. Además, el modelo considera los procesos de transferencia de energía entre las ondas infragravitatorias y el oleaje, que condicionan el run-up en playas.

### 9.1.1 ECUACIONES DE GOBIERNO

Las ecuaciones VARANS son el resultado de la integración de las ecuaciones RANS a lo largo de un volumen de control, dando lugar como resultado a una velocidad promedio dentro del volumen de integración:

$$\langle a \rangle = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} a dV$$

donde "<>" significa promediado espacial,  $V_f$  es el volumen de fluido que ocupa el volumen de integración  $V$  y  $\langle a \rangle$  es la magnitud promediada.

El volumen de integración debe ser tal que cumpla los siguientes criterios:

- Su tamaño ha de ser mayor que el tamaño del poro (escala microscópica).
- Su tamaño ha de ser menor que los movimientos que tienen lugar en el volumen (escala microscópica).

Las ecuaciones de continuidad y conservación de la cantidad de movimiento quedan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{P} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \langle \bar{u}_i' u_j' \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{\tau}_{ij} \rangle}{\partial x_j} + g_i \\ &\quad - \frac{\partial \langle \bar{u}_i'' \bar{u}_j'' \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{V_f} \int_{A_{int}} \left[ -\bar{u}_i' u_j' - \frac{\bar{P}}{\rho} \delta_{ij} + \frac{\bar{\tau}_{ij}}{\rho} \right] n_j dA \end{aligned}$$

En la ecuación de conservación de cantidad de movimiento, el último término de la ecuación representa el cambio del perfil de velocidades en la interfaz entre el medio poroso y el fluido. Éste es el responsable del modelado del intercambio de cantidad de movimiento entre la "fase fluido" y la "fase porosa". El penúltimo término representa las tensiones residuales existentes en el medio poroso tras el promedio y se obtiene como resultado del promedio en el término convectivo, paralelamente a como ocurre en el caso de la descomposición de Reynolds.

Estos dos términos comentados anteriormente constituyen el problema de cierre de las ecuaciones y necesitan ser modelados, tal y como ocurre en las ecuaciones RANS.

Se plantea como modelo de cierre dentro del medio poroso la formulación de Forchheimer, con la inclusión de un término adicional que considere la no estacionariedad del proceso (Liu et al., 1999). Es decir:

$$-\frac{\partial \langle \overline{u_i'' u_j''} \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{V_f} \int_{A_{int}} \left[ -\overline{u_i' u_j'} - \frac{\bar{P}}{\rho} \delta_{ij} + \frac{\overline{\tau_{ij}}}{\rho} \right] n_j dA =$$

$$-\left[ \frac{\alpha \nu (1-n)^2}{n^2 D_{50}^2} \langle \overline{u_i} \rangle + \frac{\beta (1-n)}{n D_{50}} \sqrt{\langle \overline{u_1} \rangle^2 + \langle \overline{u_2} \rangle^2} \langle \overline{u_i} \rangle + c_A \frac{\partial \langle \overline{u_i} \rangle}{\partial t} \right]$$

donde  $n = V_f / V$  representa la porosidad del medio,  $C_A = 0.34 (1-n)/n$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  son dos parámetros a calibrar. Los dos primeros términos del segundo miembro del modelo propuesto consideran el arrastre lineal y el no lineal, respectivamente. El último término representa el efecto de la inercia.

Las ecuaciones VARANS quedan de la siguiente forma aplicando la formulación de Forchheimer:

$$\frac{\partial \langle \overline{u_i} \rangle}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \langle \overline{u_i} \rangle}{\partial t} + \frac{\langle \overline{u_j} \rangle}{1+c_A} \frac{\partial \langle \overline{u_i} \rangle}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho(1+c_A)} \left[ -\frac{\partial \langle \bar{P} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho \langle \overline{u_i' u_j'} \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle \overline{\tau_{ij}} \rangle}{\partial x_j} + \rho g_i \right]$$

$$-\frac{1}{1+c_A} \left[ \frac{\alpha \nu (1-n)^2}{n^2 D_{50}^2} \langle \overline{u_i} \rangle + \frac{\beta (1-n)}{n D_{50}} \sqrt{\langle \overline{u_1} \rangle^2 + \langle \overline{u_2} \rangle^2} \langle \overline{u_i} \rangle \right]$$

El modelo de cierre para las tensiones de Reynolds promediadas en el volumen ( $\langle \overline{u_i' u_j'} \rangle$ ) se expresa de la siguiente manera:

$$\langle \overline{u_i' u_j'} \rangle = \frac{2}{3} \langle k \rangle \delta_{ij} - \langle \nu_t \rangle \left( \frac{\delta \langle \overline{u_i} \rangle}{\delta x_j} + \frac{\delta \langle \overline{u_j} \rangle}{\delta x_i} \right)$$

$$-\frac{\langle k \rangle^3}{\langle \varepsilon \rangle^2} \left\{ C_1 \left( \frac{\delta \langle \overline{u_i} \rangle}{\delta x_i} \frac{\delta \langle \overline{u_l} \rangle}{\delta x_j} + \frac{\delta \langle \overline{u_j} \rangle}{\delta x_l} \frac{\delta \langle \overline{u_l} \rangle}{\delta x_i} - \frac{2}{3} \frac{\delta \langle \overline{u_l} \rangle}{\delta x_k} \frac{\delta \langle \overline{u_k} \rangle}{\delta x_l} \delta_{ij} \right) + \right.$$

$$+ C_2 \left( \frac{\delta \langle \overline{u_i} \rangle}{\delta x_k} \frac{\delta \langle \overline{u_j} \rangle}{\delta x_k} - \frac{1}{3} \frac{\delta \langle \overline{u_l} \rangle}{\delta x_k} \frac{\delta \langle \overline{u_l} \rangle}{\delta x_k} \delta_{ij} \right) +$$

$$\left. C_3 \left( \frac{\delta \langle \overline{u_k} \rangle}{\delta x_i} \frac{\delta \langle \overline{u_k} \rangle}{\delta x_j} - \frac{1}{3} \frac{\delta \langle \overline{u_l} \rangle}{\delta x_k} \frac{\delta \langle \overline{u_l} \rangle}{\delta x_k} \delta_{ij} \right) \right\}$$

donde  $\langle \nu_t \rangle$  es la viscosidad de remolino,  $\langle k \rangle$  es la energía cinética turbulenta y  $\langle \varepsilon \rangle$  es el rango de disipación, todas ellas promediadas en el volumen. Análogamente al modelo  $k - \varepsilon$  la viscosidad de remolino se expresa como:

$$\langle v_i \rangle = C_D \frac{\langle k \rangle^2}{\langle \varepsilon \rangle}$$

Las ecuaciones del transporte de la turbulencia y de la disipación, se obtienen de manera análoga.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle k \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle k \rangle \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} &= \langle \bar{u}_i' \bar{u}_j' \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \langle k \rangle}{\partial x_j} \right] - \langle \varepsilon \rangle + \varepsilon_\infty \\ \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} &= C_{\varepsilon 1} \frac{\langle \varepsilon \rangle}{\langle k \rangle} \langle \bar{u}_i' \bar{u}_j' \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial x_j} \right] \\ &\quad - C_{2\varepsilon} \frac{\langle \varepsilon \rangle^2}{\langle k \rangle} + C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon_\infty^2}{k_\infty} \end{aligned}$$

Los coeficientes del modelo son los mismos que se expusieron para el modelo RANS. Los valores  $k_\infty$  y  $\varepsilon_\infty$  se obtienen a partir de las experiencias de Nakayama y Kuwahara (1999) que calibraron las ecuaciones a partir de simulaciones numéricas de flujo en un medio poroso, formado por poros de forma rectangular. Los números de Reynolds con los que se realizó el análisis estaban entre  $10^5$  y  $10^7$ . Sus resultados llegan a las siguientes expresiones de los parámetros:

$$\varepsilon_\infty = 39.0(1-n)^{2.5} n^2 \left( \langle \bar{u}_1 \rangle^2 + \langle \bar{u}_2 \rangle^2 \right)^{1.5} \frac{1}{D_{50}}$$

$$k_\infty = 3.7(1-n)n^{1.5} \left( \langle \bar{u}_1 \rangle^2 + \langle \bar{u}_2 \rangle^2 \right)$$

### 9.1.2 IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

El modelo resuelve las ecuaciones de gobierno mediante un esquema de diferencias finitas de proyección en dos pasos (Chorin, 1968). En el primer paso resuelve una velocidad intermedia que atiende a la ecuación de conservación de cantidad de movimiento de la siguiente manera:

$$\frac{\tilde{u}_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = -u_j^n \frac{\partial u_j^n}{\partial x_j} + g_i + \frac{\partial \tau_{ij}^n}{\partial x_j}$$

donde  $\tilde{u}_i^{n+1}$  representa la velocidad intermedia y  $\Delta t$  es el paso de tiempo. La ecuación anterior es idéntica a la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, pero en ésta se ha eliminado el término de presión.

El siguiente paso consiste en realizar una proyección de la velocidad intermedia en un plano de divergencia nula, es decir, resolver el sistema siguiente:

$$\frac{u_i^{n+1} - \tilde{u}_i^n}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i}$$

$$\frac{\partial u_i^{n+1}}{\partial x_i} = 0$$

La divergencia de la ecuación anterior y su posterior sustitución en la residual de momento nos da el gradiente de presiones en el instante  $n + 1$ . La ecuación resultante es la ecuación de Poisson (Poisson Pressure Equation - PPE):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} \right) = \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial \tilde{u}_i^{n+1}}{\partial x_i}$$

Resolviendo la ecuación anterior se obtiene el valor de la presión en el paso  $n + 1$ ; posteriormente, para la obtención del campo de velocidades en el instante  $n + 1$  se sustituye el valor de la presión obtenido en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento completa, es decir:

$$\frac{\tilde{u}_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} + u_j^n \frac{\partial u_j^n}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial \tau_{ij}^n}{\partial x_j}$$

### 9.1.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO

El modelo IH2VOF ha sido ampliamente validado mediante el uso de una amplia base de datos de velocidades y presiones de ensayos de laboratorio. Así se muestra en las siguientes publicaciones científicas en revistas indexadas:

- Stability analysis of a non-conventional breakwater for wave energy conversion. Di Lauro, E., Lara, J.L., Maza, M., Losada, I.J., Contestabile, P., Vicinanza, D. (2019). Coastal Engineering, Vol. 145, pp. 36-52.
- Numerical modelling of coastal structures stability. Guanche, R., Losada, I.J., Lara, J.L. (2009). Coastal Engineering, ELSEVIER. Vol. 56(5-6), pp. 543-558
- Wave interaction with low mound breakwaters using a RANS model. Lara, J.L., Losada, I.J., Guanche, R. (2008). Ocean Engineering, ELSEVIER. Vol. 35(13), pp. 1388-1400
- Wave Overtopping Of Póvoa De Varzim Breakwater: Physical And Numerical Simulations. Neves, M.G., Reis, M.T., Losada, I.J., Asce, M., Keming, H. (2008). Journal of Waterways, Port, Coastal And Ocean Engineering 10, pp. 203-264
- Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. Losada, I.J., Lara, J.L., Guanche, R., Gonzalez-Ondina, J.M. (2008). Coastal Engineering, ELSEVIER. Vol. 55(1), pp. 47-62
- RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. Lara, J.L., Garcia, N., Losada, I.J. (2006). Coastal Engineering, ELSEVIER. Vol. 53(5-6), pp. 395-417
- A numerical wave flume to study the functionality and stability of coastal structures. Lara, J.L. (2005). Journal of the International Navigation Association (PIANC), 121: 5-29
- Modelling of velocity and turbulence fields around and within low-crested rubble-mound breakwaters. Losada I.J., Lara J.L., Christensen E.D, Garcia, N. (2005). Coastal Engineering, ELSEVIER. Vol 52 (10-11), pp. 887-913
- 2D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters. Garcia, N., Lara, J.L., Losada, I.J. (2004). Coastal Engineering, ELSEVIER. Vol. 51 (10), pp. 991-1020

## 9.2 DESCRIPCIÓN MODELO NUMÉRICO IHPROPAGA

La transformación de oleaje se efectúa utilizando el modelo espectral SWAN (Simulating WAVes Nearshore), desarrollado por Delft University of Technology (Holthuijsen, 2007). SWAN es un modelo numérico de oleaje de tercera generación de fase promediada que permite simular los efectos de refracción, asomeramiento, difracción, rompiente debida a esbeltez e influencia del fondo, efectos de viento, interacción ola-ola y whitecapping en regiones costeras y aguas interiores. Todo esto se encuentra incorporado dentro de IHPropaga.

La estrategia de IHPropaga reúne el marco global para el reanálisis de ondas hacia áreas costeras, reduciendo drásticamente el esfuerzo de tiempo computacional (alrededor de 1000 x) mediante el uso de una metodología híbrida (Camus et al., 2013), que combina modelos numéricos (reducción de escala dinámica) y herramientas matemáticas (estadísticas de reducción de escala).

La interfaz gráfica de IHPropaga maneja fácilmente todos los requisitos de configuración de SWAN, incluidos los procesos previos y posteriores relacionados con:

- Sistema de referencia de batimetría: UTM o geográficas (Latitud-Longitud).
- Mallas de ejecución: estructuradas (rectangular, con un anidamiento de mallas) o no estructurada.
- Ejecución estacionaria o no-estacionaria.
- Condiciones de contorno (oleaje y viento): variación espacial o constante; sólo viento, sólo oleaje u oleaje y viento.
- Estados de mar a ejecutar.
- Resultados: espectros de oleaje o sólo parámetros de estados de mar.
- Reconstrucción de series temporales de parámetros (técnica RBF).

## 9.3 TABLAS DE INCIDENCIA DE OLAJE EN PROFUNDIDADES INDEFINIDAS

		Dirección [°]										% Rel.	% Acum.
		27 - 43	43 - 59	59 - 75	75 - 91	91 - 107	107 - 123	123 - 139	139 - 155	155 - 171	171 - 187		
Altura significativa [m]	0.0 - 0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.5 - 1.0	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05
	1.0 - 1.5	0.05	0.28	1.09	3.46	6.67	5.06	1.85	0.48	0.08	0.00	19.02	19.07
	1.5 - 2.0	0.03	0.25	0.93	4.36	15.03	23.04	10.64	3.59	0.66	0.04	58.58	77.65
	2.0 - 2.5	0.00	0.01	0.04	0.15	1.16	8.11	6.84	2.11	0.51	0.05	18.98	96.64
	2.5 - 3.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.96	1.31	0.51	0.18	0.01	2.98	99.61
	3.0 - 3.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.16	0.10	0.03	0.00	0.35	99.97
	3.5 - 4.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	100.0
	4.0 - 4.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
	4.5 - 5.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
% Rel.		0.08	0.54	2.07	7.99	22.89	37.25	20.81	6.81	1.46	0.10		
% Acum.		0.08	0.63	2.70	10.68	33.57	70.82	91.63	98.44	99.90	100.0		

		Periodo pico [s]										% Rel.	% Acum.
		5.0 - 6.8	6.8 - 8.6	8.6 - 10.4	10.4 - 12.2	12.2 - 14.0	14.0 - 15.8	15.8 - 17.6	17.6 - 19.4	19.4 - 21.2	21.2 - 23		
Altura significativa [m]	0.0 - 0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.5 - 1.0	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05
	1.0 - 1.5	0.58	8.06	3.91	2.59	2.33	1.07	0.40	0.09	0.01	0.00	19.02	19.07
	1.5 - 2.0	0.35	27.11	13.42	5.79	7.12	3.38	1.15	0.20	0.04	0.01	58.58	77.65
	2.0 - 2.5	0.01	6.60	7.71	1.06	1.91	1.17	0.44	0.07	0.01	0.00	18.98	96.64
	2.5 - 3.0	0.00	0.51	1.70	0.25	0.23	0.18	0.08	0.02	0.00	0.00	2.98	99.61
	3.0 - 3.5	0.00	0.02	0.19	0.08	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.35	99.97
	3.5 - 4.0	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	100.0
	4.0 - 4.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
	4.5 - 5.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.0
% Rel.		0.94	42.31	26.96	9.78	11.64	5.84	2.08	0.38	0.07	0.01		
% Acum.		0.94	43.25	70.21	79.99	91.62	97.46	99.54	99.92	99.99	100.00		

		Dirección [°]										% Rel.	% Acum.
		27 - 43	43 - 59	59 - 75	75 - 91	91 - 107	107 - 123	123 - 139	139 - 155	155 - 171	171 - 187		
Periodo pico [s]	5.0 - 6.8	0.00	0.00	0.06	0.26	0.40	0.14	0.06	0.02	0.00	0.00	0.94	0.94
	6.8 - 8.6	0.00	0.01	0.22	3.28	13.98	17.51	6.59	0.63	0.07	0.00	42.31	43.25
	8.6 - 10.4	0.01	0.10	0.43	1.23	4.30	13.59	6.31	0.83	0.14	0.02	26.96	70.21
	10.4 - 12.2	0.01	0.12	0.35	0.79	1.41	2.68	2.72	1.48	0.22	0.01	9.78	79.99
	12.2 - 14.0	0.02	0.13	0.44	1.32	1.66	2.15	3.22	2.15	0.53	0.03	11.64	91.62
	14.0 - 15.8	0.03	0.13	0.39	0.77	0.81	0.83	1.31	1.21	0.34	0.03	5.84	97.46
	15.8 - 17.6	0.02	0.05	0.16	0.26	0.27	0.28	0.49	0.39	0.14	0.01	2.08	99.54
	17.6 - 19.4	0.00	0.00	0.02	0.07	0.05	0.05	0.09	0.08	0.02	0.00	0.38	99.92
	19.4 - 21.2	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.07	99.99
	21.2 - 23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	100.0
% Rel.		0.08	0.54	2.07	7.99	22.89	37.25	20.81	6.81	1.46	0.10		
% Acum.		0.08	0.63	2.70	10.68	33.57	70.82	91.63	98.44	99.90	100.0		

## 9.4 TABLA DE INCIDENCIA DE VIENTO

		Dirección [°]										% Rel.	% Acum.
		0 - 36	36 - 72	72 - 108	108 - 144	144 - 180	180 - 216	216 - 252	252 - 288	288 - 324	324 - 360		
Velocidad del viento [m/s]	0.0 - 1.4	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.13	0.13
	1.4 - 2.8	0.03	0.10	0.26	0.31	0.12	0.04	0.01	0.00	0.00	0.01	0.88	1.01
	2.8 - 4.2	0.06	0.48	2.03	2.16	0.52	0.06	0.01	0.00	0.00	0.01	5.33	6.34
	4.2 - 5.6	0.09	1.42	9.00	9.74	1.24	0.06	0.00	0.00	0.00	0.01	21.56	27.90
	5.6 - 7.0	0.12	2.43	14.68	18.74	2.20	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	38.22	66.12
	7.0 - 8.4	0.05	1.16	6.44	14.59	2.26	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	24.52	90.64
	8.4 - 9.8	0.01	0.09	0.72	5.68	1.17	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	7.68	98.33
	9.8 - 11.2	0.00	0.00	0.03	1.12	0.32	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.49	99.82
	11.2 - 12.6	0.00	0.00	0.00	0.11	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	99.99
	12.6 - 14.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	100.0
% Rel.		0.37	5.72	33.18	52.48	7.91	0.25	0.03	0.01	0.01	0.04		
% Acum.		0.37	6.09	39.27	91.75	99.66	99.91	99.94	99.95	99.96	100.0		

## 9.5 ESTADOS DE MAR SELECCIONADOS PARA PROPAGACIÓN IHPROPAGA

Id	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dirección [°]	Marea [m]	Velocidad viento [m/s]	Dirección viento [°]
01	4.0	14.9	144.0	1.8	14.5	128
02	3.9	14.9	145.1	2.1	13.2	132
03	3.8	10.2	119.6	1.9	12.8	126
04	3.7	10.1	132.5	0.5	11.2	153
05	3.6	9.6	152.2	1.4	5.6	160
06	3.5	14.3	148.8	0.7	9.5	142
07	3.4	9.3	30.2	1.6	6.1	156
08	3.4	11.2	133.0	1.0	8.2	125
09	3.3	11.2	131.1	1.5	10.5	154
0A	3.2	10.4	130.5	2.2	8.9	137
0B	3.1	10.6	129.0	1.0	5.6	124
0C	3.0	11.2	171.3	0.6	3.8	126
0D	2.8	9.2	129.0	1.5	10.1	133
0E	2.7	8.3	147.1	1.3	10.4	121
0F	2.6	8.8	113.7	2.2	12.3	123
0G	2.5	9.4	133.6	0.6	6.3	146
0H	2.4	8.5	129.4	1.1	9.5	129
0I	2.3	10.4	114.0	2.0	7.6	147
0J	2.3	8.6	112.3	0.9	8.9	140
0K	2.2	14.7	130.8	2.0	8.5	117

## 9.6 TABLAS CON RESULTADOS DE ESTADOS DE MAR PROPAGADOS

### 9.6.1 ARRECIFE PLATAFORMA

Id	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dirección [°]	Marea [m]
01	3.90	14.42	125.08	1.79
02	3.76	14.42	125.90	2.09
03	3.09	9.85	117.14	1.88
04	2.87	9.85	122.54	0.51
05	2.73	9.85	135.70	1.38
06	3.09	14.42	127.75	0.72
07	2.10	8.95	77.25	1.61
08	2.65	10.84	123.86	0.97
09	2.72	10.84	121.96	1.52
0A	2.48	10.84	122.94	2.20
0B	2.35	10.84	123.23	1.00
0C	2.36	10.84	139.39	0.55
0D	2.25	8.95	121.26	1.54
0E	2.19	8.14	129.01	1.33
0F	2.45	8.95	114.75	2.22
0G	1.90	9.85	124.77	0.58
0H	1.86	8.95	121.95	1.10
0I	1.83	10.84	115.08	1.98
0J	1.78	8.95	114.05	0.93
0K	2.01	14.42	121.29	1.96

### 9.6.2 ARRECIFE FRANJA

Id	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dirección [°]	Marea [m]
01	3.86	14.42	123.80	1.79
02	3.66	14.42	124.61	2.09
03	3.20	9.85	115.63	1.88
04	2.89	9.85	120.98	0.51
05	2.48	9.85	134.06	1.38
06	2.95	14.42	126.48	0.72
07	1.97	8.95	73.67	1.61
08	2.64	10.84	122.90	0.97
09	2.74	10.84	120.72	1.52
0A	2.49	10.84	121.68	2.20
0B	2.37	10.84	122.33	1.00
0C	1.98	10.84	137.95	0.55
0D	2.27	8.95	119.63	1.54
0E	2.12	8.14	126.34	1.33
0F	2.51	8.95	113.00	2.22
0G	1.95	9.85	125.84	0.58
0H	1.92	8.95	122.39	1.10
0I	1.93	10.84	114.26	1.98
0J	1.85	8.95	112.97	0.93
0K	2.03	14.42	121.00	1.96



